

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

MĚŘENÍ RYCHLOSTI S POUŽITÍM RADARU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ MARTINŮ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

MĚŘENÍ RYCHLOSTI S POUŽITÍM RADARU

SPEED MEASUREMENT USING RADAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ MARTINŮ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2013

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá měřením rychlosti s využitím radaru s kontinuálním vysíláním. V úvodní části jsou popsány základní rozdíly radarových modulů a jejich principy. Ústřední část je věnována zpracování signálu radaru K-MC1, K-MC4, který obsahuje data zachycující pohyb objektu. K určení rychlosti sledovaného objektu byl využit Dopplerův jev. Navíc byla využita technika pro měření vzdálenosti nazývaná FSK a také byly řešeny problémy spojené s kosinovým faktorem. K ověření výkonnosti a stability byla aplikace otestována na sérii vhodných objektů. Na závěr je navržená aplikace vyhodnocena a uvedeno možné pokračování této práce.

Abstract

Bachelor's thesis is focused on method of object's speed detection using a low-cost continuous wave radar module. In the first section, it describes differences between basic types of radar modules and their fundamental principles. The main part of thesis is dedicated to signal processing of radar modules K-MC1, K-MC4, that contents data to analyze moving objects. Doppler effect is used to determine the object's relative speed. Moreover, there is used FSK technique to measure the distance and there are solved issues associated with cosine factor. To verify the performance and stability, the application is tested on a several appropriate objects. In the end, the implemented application is evaluated and the possible continuation of this work is stated.

Klíčová slova

Dopplerův jev, měření rychlosti, radar s kontinuálním vysíláním, monopulsní radar srovnávací fáze, frekvenční modulace, FSK, kosinový faktor

Keywords

Doppler effect, speed measurement, continuous wave radar, phase-comparison monopulse radar, frequency modulation, FSK, cosine factor

Citace

Lukáš Martinů: Měření rychlosti s použitím radaru, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Měření rychlosti s použitím radaru

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření rychlosti s použitím radaru vypracoval samostatně s použitím literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedené v referencích na konci této práce pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka.

.....
Lukáš Martinů
13. května 2013

Poděkování

Děkuji Ing. Lukášovi Maršíkovi za cenné rady při vypracování bakalářské práce, připravenou část aplikačního rozhraní a za zapůjčení radarového modulu, bez kterého by aplikace nemohla vzniknout.

© Lukáš Martinů, 2013.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 3 |
| 2 | Současné znalosti z oblasti radaru | 4 |
| 2.1 | Historie | 4 |
| 2.2 | Princip radaru | 6 |
| 2.3 | Rozdělení radarů | 9 |
| 2.4 | Dopplerův jev | 11 |
| 2.5 | Detekce úhlu pozice pozorovaného cíle | 12 |
| 3 | Měření pomocí CW radaru | 14 |
| 3.1 | Použitý radar | 14 |
| 3.2 | Radarová data | 16 |
| 3.3 | Přípravení signálu | 16 |
| 3.4 | Frekvenční analýza | 18 |
| 3.5 | Vyhodnocení rychlosti cíle | 19 |
| 3.6 | Úhlové měření a korekce | 20 |
| 3.7 | Techniky pro měření vzdálenosti | 21 |
| 4 | Implementace aplikace | 24 |
| 4.1 | Návrh v prostředí MATLAB | 24 |
| 4.2 | Návrh v Qt | 26 |
| 5 | Vyhodnocení | 30 |
| 5.1 | Testování | 30 |
| 5.2 | Přesnost měření | 31 |
| 6 | Závěr | 33 |
| A | Obsah CD | 36 |
| B | Manual | 37 |
| B.1 | Návod na instalaci | 37 |
| B.2 | Ovládání aplikace | 37 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Magnetron – vysoce výkonná elektronka sloužící jako generátor mikrovlnného záření [2]. | 5 |
| 2.2 | Základní dělení aktivních radarů. | 9 |
| 2.3 | Blokové schéma pulzního radaru [8]. | 11 |
| 2.4 | Blokové schéma radaru s kontinuálním vysíláním [8]. | 12 |
| 3.1 | Radarový modul K-MC4. Rozměry $78 \times 98 \times 7mm^3$ [15]. | 14 |
| 3.2 | Diagram K-MC4 modulu ukazující citlivost antény ve směru azimutu (modrá) a elevace (červená). Výsledná šířka svazku vysílaných paprsků $30^\circ \times 12^\circ$ [15]. | 15 |
| 3.3 | Opožděný příjem signálu anténou Rx1 [15]. | 15 |
| 3.4 | Příklad komplexního radarového signálu, který naznačuje pohyb ruky před radarovým modulem. | 17 |
| 3.5 | Vznik aliasingu – dvě rozdílné sinusovky zapadají do stejné sady vzorků. . . | 17 |
| 3.6 | Tvary okenních funkcí (Hammingovo vlevo, Hannigovo vpravo) [12, 13]. . . | 19 |
| 3.7 | Příklad frekvenčního spektra radarového signálu z obrázku 3.4 zobrazujícího různé hodnoty frekvenčních binů; Frekvenční vrchol je na $f = -50$ Hz, což odpovídá relativní rychlosti objektu $v = 1.12$ km/hod. | 20 |
| 3.8 | Závislost kosinového faktoru v závislosti na úhlu při pohybu po křivce [19]. . | 21 |
| 3.9 | a.) Přenášený frekvenčně modulovaný signál; b.) Trojúhelníkový vysílaný (Tx) a přijímaný (Rx) signál, kde Δt odpovídá vzdálenosti objektu; c.) Vzdálenost lze poté vypočítat f_{IF} . Dopplerův posun lze určit pomocí získání frekvenčního vrcholu na sestupné/vzestupné hraně signálu (zelený signál) [1, 11]. | 22 |
| 3.10 | FSK modulace – použití dvou diskretních frekvencí [11]. | 23 |
| 4.1 | Analýza dat nahraných radarovým modulem. | 26 |
| 4.2 | Zpracování bloku signálu. | 26 |
| 4.3 | Ukázka grafického rozhraní výsledné aplikace při zpracování radarových dat. Součástí signálu jsou informace o pohybu osoby směrem od modulu... . . . | 28 |
| 4.4 | ... a jeho pokračování ukazující změnu vzdálenosti objektu od radarového modulu. | 29 |
| B.1 | Ukázka možného nastavení zpracování signálu a zobrazení hodnot na LCD displejích. | 38 |
| B.2 | Ukázka logu zobrazující signál obsahující pohybující se vozidlo a jeden vzorek šumu. | 39 |
| B.3 | Ukázka grafu zobrazující signál obsahující pohybující se vozidlo. | 39 |
| B.4 | Ukázka záložky Player. | 39 |
| B.5 | Ukázka záložky Record. | 39 |

Kapitola 1

Úvod

Radar je elektromagnetické zařízení určené k odhalování objektů a zjišťování jejich vlastností. Využívá k tomu přenos signálu různých tvarů, typů vysílání v závislosti na principu daného modulu a aplikaci, pro níž je využit. Mezi jeho mnohé výhody patří schopnost určit důležité informace spojené s konkrétním objektem. Lze tedy mj. zjistit rychlost pohybu objektu, jeho směr, vzdálenost a v některých případech lze také dokonce vyextrahovat informaci o velikosti daného objektu. Rychlost je možné určovat pomocí Dopplerova jevu. Pro určování vzdálenosti se poté užívají různé techniky, většinou založené na frekvenční modulaci vysílaného signálu radarovým modulem.

Základní myšlenkou pro vývoj těchto zařízení je jejich schopnost rozšířit člověku přehled o vzezení prostředí, které může i ve ztížených podmínkách lépe a rychleji prozkoumat. Z toho plyne hned několik možných využití radarových modulů. Mohou to být vestavěné systémy umístěné např. v letadle, kde jeho nejjednodušší funkcí je detekce vzdálenosti letadla od povrchu země, dále je to také jediný pomocník v případě mlhy, tmy, deště, sněhu a dalších přírodních podmínkách, které znesnadňují nebo přímo znemožňují člověku sledovat okolí a stává se tak jediným smyslem, díky kterému je možné zachytit možné nebezpečí a zabránit tak katastrofě.

V dnešní době se již radarové moduly staly natolik dostupné, že se stávají součástí mnohých zařízení, u kterých to nedávno nebylo možné. Vestavěné systémy obsahující radary nebo zařízení fungující na podobném principu se dnes využívají např. v astronomii, předpovědích počasí, automobilovém průmyslu jako parkovací asistenty (ultrazvuková čidla, lasery), letovém provozu a mnohé jiné.

V tomto textu budou do detailů popsány techniky zaměřující se především na analýzu signálu za účelem získání důležitých informací o sledovaném objektu a potíže s tímto spojené. Mimo jiné bude v kapitole 2 uveden vývoj radarů od jeho počátku, popsání přelomových okamžiků v historii radiotechniky, princip funkce radarů a také přehled užití frekvenčních pásem v praxi. Kapitola 3 je věnována popisu zpracování signálu radarových modulů K-MC1, K-MC4 [15], na kterém byla data nasbírána a přístup k možným řešením problémů. Jsou zde rozebrány situace spojené se směrem pohybu objektu a jeho úhlu k radarovému modulu a naznačeny možné nepřesnosti měřicího systému. Implementační prostředí, použité pro tvorbu této aplikace, je popsáno v kapitole 4 spolu s ukázkovými obrázky, jak vypadá program v praxi. V kapitole 5 je uvedeno několik testovacích případů, na kterých byla ověřena výkonnost a stabilita navržené aplikace a výsledky vyhodnoceny. Na závěr je navrženo možné pokračování této práce.

Kapitola 2

Současné znalosti z oblasti radaru

Radiolokátor je název odvozen z latinského “loco”, což v překladu znamená “místo” nebo “umísťuji, zjišťuji”. Radiolokátor je tedy přístroj pro zjišťování a podobné slovo radiolokace pak označuje způsob, jakým se zjišťuje. Radar (zkr. z anglického spojení – **R**adio **D**etecting **A**nd **R**anging) je tedy elektronické zařízení, které slouží k odhalování objektů a určování jejich vzdálenosti, rychlosti a také směru jejich pohybu. Využívá při tom krátkých elektromagnetických vln. V této kapitole je popsána historie radarů, jejich dělení a také je zde rozebrán princip funkce [20].

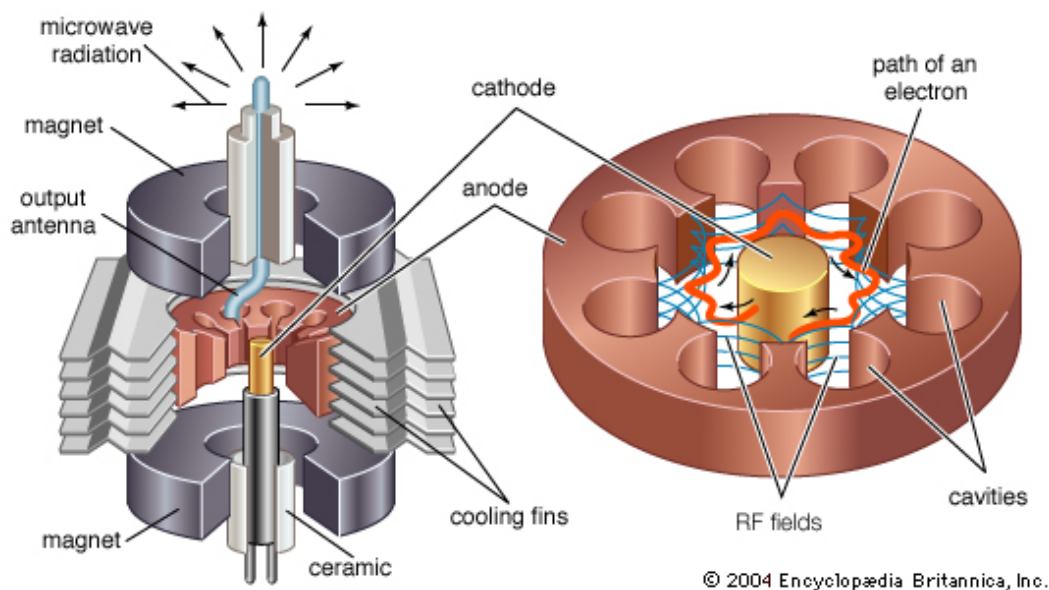
2.1 Historie

Na vynálezu radaru se nepřímo podílelo mnoho vědců z různých koutů světa. První krůček udělal James Clerk Maxwell v roce 1865, když předvedl svoji Teorii o elektromagnetickém poli. Ukázal, že elektrické a magnetické pole se pohybuje ve formě vln konstantní rychlostí (rychlost světla) [25]. V roce 1886 podpořil Maxwellovu teorii německý fyzik Heindrich Rudolf Hertz, který prokázal existenci těchto vln, nicméně oblast jejich využití nebyla určena. Na počátku v radiotechnice nebyly tyto průlomové teorie brány jako nijak zvlášť úspěšné a pokrok tedy nebyl příliš rychlý [18, 24]. Dalšího úspěchu dosáhl italský vynálezce Guglielmo Marconi, který je dnes znám jako průkopník radiové komunikace. Ke konci 19. století se mu podařil první přenos elektromagnetických vln na delší vzdálenosti pomocí navinutého drátu na dřevěné tyči.

Zásadním milníkem v historii je zařízení, které se podařilo zkonstruovat Christiánu Hülsmeyerovi v roce 1904. To bylo patentováno a poté představeno na sjezdu INA (Internatinal Navigation Association) v Rotterdamu, kde se mu ovšem nepodařilo zaujmout novou technologií. Tímto zařízením je telemobiloskop informující o lodním provozu na vodní hladině ve slabé viditelnosti. Bylo to vůbec první použití radaru. Hülsmeyer tímto úspěch nezískal a vědecké pole radiotechniky poté opustil [8, 18, 24, 25].

Důležitou součástí pro radarovou technologii je generátor vln. Roku 1920 byl vyvinut první oscilátor, který byl schopen generovat vlny ve velmi vysokých frekvencích, až 300 MHz. Po jeho tvůrcích byl pojmenován Barkhausen-Kurz oscilátor. Tento přístroj byl dále používán při pokusech s odrazem rádiových vln od lodí a letadel. Dalším generátorem se stal Magnetron (viz Obrázek 2.1), který vyvinul americký fyzik Albert Wallace Hull. Magnetron byl později využit britskou armádou při tvorbě radaru [4, 25].

Skutečným vynálezcem radaru se stal Robert Watson-Watt. Až v roce 1935 zkonstruoval první prakticky použitelný přístroj pro rádiovou detekci letadel. Na důkaz, že jeho objev



Obrázek 2.1: Magnetron – vysoce výkonná elektronka sloužící jako generátor mikrovlnného záření [2].

je schopen detekovat objekty, demonstroval ukázkou, která zahrnovala dvě přijímací antény, vzdálené asi 10 kilometrů od stanice BBC s krátkými vlnami. Antény byly posunuty tak, aby se signály přicházející přímo od stanice vyrušily, ale ostatní signály, přicházející z jiných úhlů, byly přijaty na daném indikátoru. Jednalo se o pasivní radar, který ovšem sklidil obrovský úspěch. Originál jeho přístroje je exponátem londýnského Science Museum. V roce 1937 už existovalo v Anglii pět systémů, které měly dosah až 100 km [8, 24].

Poté v průběhu let byl velice podporován vývoj radarů a jeho součástí. Magnetron se v roce 1940 dočkal vylepšení. Dva inženýři, Randall a Boot sestavili malý, ale velice účinný radar využívající právě tento Magnetron. Radary se začaly využívat na mikrovlnných frekvencích [8, 25].

Během války docházelo ještě k dalšímu vylepšování radarů, jejich dosahu a možností. Např. USA během 2. světové války investovaly do vývoje radarové techniky přes 2,1 miliardy dolarů, což byla suma srovnatelná s náklady na vývoj jaderných zbraní. Nicméně nejen v USA byly snahy o vylepšování technologií na poli radiotechniky. Ve Francii a Rusku byly tyto pokusy přerušeny německou okupací. Naopak vývoj v Japonsku doznal jistých úspěchů po získání amerických technologií na Filipínách a odhalení německých radarů. Německo samo o sobě vyvinulo mnoho druhů radarů pro pozemní detekce jednotek, lodních modulů a vzdušných systémů. Dodnes jsou používány radary i jako ochrana proti hrozbě vojenského útoku v podobě raket [16, 18].

Nejen na poli vojenské techniky nalezla radarová technika svého využití. Radary přispěli také k vývoji v poznávání vesmíru. V roce 1946 se odehrál první experiment s odrazem radarového signálu od povrchu Měsíce. Po tomto pokusu bylo zahájeno zkoumání planet a jejich měsíců právě pomocí radarového mapování [8].

Radary dále našly uplatnění také v předpovědi počasí. Pomocí signálu odraženého od mraku lze určit např. jeho vertikální mocnost, množství vodních kapek a rychlost postupu oblačnosti [14].

Vývoj v této oblasti byl také ovlivněn příchodem polovodičů. Změny doznalo nejen

zpracování přijatého signálu, ale byly také konstruovány zesilovače a docházelo ke zvyšování dosahu jednotlivých přístrojů.

Později vznikají radary s mimořádně vysokou rozlišovací schopností (radary SAR – se syntetickou aperturou). Umožnili dálkové mapování Země i její podmořské hladiny. Využívá vzájemného pohybu mezi anténou a sledovanou plochou [5].

2.2 Princip radaru

Radar je založen na vysílání (periodického nebo kontinuálního) a přijímání elektromagnetického vlnění. Toto vlnění se vyskytuje ve velice širokém spektru vlnových délek, ovšem radiolokátory využívají pouze část tohoto spektra. Z tabulky 2.2 lze vyčíst i typické užití jednotlivých vlnových délek. Nejznámější jsou policejní radiolokátory, které vysílají signál o frekvenci 24.150 GHz pro klasické měření rychlosti nebo 34.3 GHz pro fotokamery umístěné na semaforech [16, 20].

Generátorem vlnění může být elektronka (magnetron, klystron, permaktron) nebo polovodičový prvek. Tento vygenerovaný signál je přenesen na vysílací anténu a vyslán do prostoru. Signál se poté odráží od povrchu objektů různými směry a poté zpátky na přijímací anténu radiolokátoru. Odrazivost každého povrchu je různá a také závisí na délce vyslané vlny. Nejlépe se vlnění odráží od elektricky vodivých materiálů jako jsou kovy. Přijatý signál dále vyhodnocuje výpočetní technika za účelem zjištění informací o sledovaném objektu. Je možné získat informace o poloze, vzdálenosti, relativní rychlosti objektu vzhledem k radaru a také směru jeho pohybu. Pro výpočet rychlosti se využívá Dopplerova jevu. Vzdálenost se určuje v závislosti na použitém radaru. V případě použití pulzních typů lze odvodit vzdálenost podílem rozdílu příchodu časů jednotlivých impulzů a rychlosti šíření vlnění [16, 21]. V případě radiolokátorů s kontinuálním vysíláním je situace o něco komplikovanější a bude popsána v následující kapitole.

Kvalita radarového systému je ovlivněna velkým množstvím situací, pro něž je použit a také pro něž je vytvářen. Při analýze výkonnosti systému pro odhalování objektů patří mezi nejdůležitější parametry pravděpodobnost odhalení objektu P_D a pravděpodobnost falešného poplachu P_{FA} . V některých systémech se tedy při zvyšování P_D musí počítat se zvýšením hodnoty P_{FA} . Těchto výsledků se dosahuje z důvodu poměru signálu k jeho rušení okolím signal-to-interference ratio (SIR). V případě několika objektů v pozorovacím úhlu radiolokátoru se mohou vytvořit navíc nechtěné vrcholy ve frekvenčním spektru při vyhodnocování signálu. Problém může také nastat, pokud nemohou být radarem rozlišeny dva pozorované objekty, protože se nacházejí příliš blízko sebe a radaru jejich signály splývají. Hodnoty odraženého signálu od jednoho objektu mohou zastiňovat informace o tom druhém a naopak [16].

2.2.1 Základní části radaru

Části radarových systému se od sebe mohou lišit podle použití, pro které je vytvářen. Běžné systémy obsahují indikátory, displeje, procesory apod. To však není podmínkou. Mezi základní komponenty radiolokátoru patří [8, 25]:

- **Vysílač** – Vysílá rádiový signál a řídí jeho vlnovou délku.
- **Přijímač** – Zachycuje odražený signál (echo) a připravuje ho na další zpracování. V závislosti na vzdálenosti, ale i mnohých dalších vlivech, se síla přijímaného signálu liší. Přijímač tedy musí signál vhodně zesílit.

| Frekvenční radarová pásma | | |
|---------------------------|-------------------|--|
| Označení pásma | Kmitočtový rozsah | Typické užití |
| VHF | 50–300 MHz | Velmi daleký dosah |
| UHF | 300–1000 MHz | Velmi daleký dosah |
| L | 1–2 GHz | Daleký dosah, řízení letového provozu |
| S | 2–4 GHz | Lokální řízení letového provozu, meteorologické radiolokátory dalekého dosahu, námořní radiolokátory |
| C | 4–8 GHz | Satelitní radiolokační opakovací |
| X | 8–12 GHz | Navádění řízených raket, námořní/meteorologické radiolokátory, dohled pozemní situace, střední rozlišovací schopnost |
| K_u | 12–18 GHz | Vysoké rozlišení, družice |
| K | 18–27 GHz | Omezené použití kvůli pohlcení vodními parami, detekce oblačnosti, policejní radary, zbraňové radiolokátory |
| K_a | 27–40 GHz | Krátký dosah, mapování, řízení letového provozu v dosahu letišť, policejní fotografické radary |
| mm | 40–100+ GHz | Experimentální |

Tabulka 2.1: Užití jednotlivých frekvenčních radarových pásem [22].

- **Anténa** – Na kvalitě antény závisí směrové rozlišení, citlivost a také dosah radaru. Součástí radarového systému může být použito více antén.
- **Přepínač** – Je využíván v případech, kdy je pro vysílač i přijímač společná anténa. Zabraňuje průniku signálu z vysílače na přijímač v době vysílání a naopak v době příjmu zabraňuje průniku signálu z přijímače na vysílač.
- **Generátor vln** – Vytváří modulovaný signál (využívá při tom oscilátor – magnetron, klystron) na požadované frekvenci RF (radio frequency). Ten je poté násoben na požadovanou úroveň a předán vysílači.

2.2.2 Maximální dosah

Pro svoji funkci potřebuje radar na přijímači, co nejsilnější signál, který lze dále zpracovat a získat z něj požadované informace. Z tohoto důvodu je maximální dosah ovlivněn výkonem přijatého signálu a dále také podílu šumu na přijímači. Rovnici vyjadřující závislost přenášeného a přijatého signálu lze popsat následovně [17]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \quad (2.1)$$

kde první zlomek označuje hustotu výkonu ve vzdálenosti R od radaru vyzařující výkon P_t z antény zisku G_t . V druhé části výpočtu σ označuje závislost odražené energie na velikosti objektu a jeho odrazivosti. Tento parametr se nazývá ekvivalentní odrazivá plocha (RCS – radar cross section) a jeho jednotkou je m^2 . Jmenovatel druhého faktoru vyjadřuje divergenci (v tomto případě zánik) echa na cestě zpět k radaru. Tyto dva faktory představují

výkon na jednotku plochy přijatý radarovou anténou. Faktor A_e označuje efektivní plochu přijímací antény [17, 20].

Šum je nechtěná elektromagnetická energie, která zasahuje do schopnosti přijímače detekovat požadovaný signál. Rušivý signál může být přijímán z okolí nebo také může vzniknout na samotném přijímači vlivem ohřívání jeho součástí. Tento šum lze vyjádřit vztahem [17]:

$$N = (F - 1)kT_0B \quad (2.2)$$

kde N označuje teplotní šum přijímače. Dále F šumové číslo přijímače a k označující Boltzmannovu konstantu (1.38×10^{-23} watt-sec/°K), která vyjadřuje vztah mezi teplotou a energií plynu. T_0 je teplota (standardní teplota – 290 °K) a B je šířka pásma přijímače. Přičemž šum F lze vyjádřit rovnicí [20]:

$$F_n = \frac{N_0}{kT_0B_nG_a} = \frac{\text{sum z prijimace}}{\text{sum z idealniho prijimace za standardni teploty } T_0} \quad (2.3)$$

kde N_0 je tedy výstupní šum z přijímače a G_a je dostupný zisk. Šum N_0 je měřen jako lineární podíl vstupně-výstupní charakteristiky přijímače, většinou na výstupu IF zesilovače.

SNR (Signal to noise ratio – poměr signál/šum) je dán poté poměrem [17]:

$$SNR = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{4\pi^2 R^4 k T_0 (F - 1) BL} \quad (2.4)$$

kde je nutné ještě započítat L označující atmosferické ztráty a další ztráty způsobené nedokonalostí systému.

Dosah radaru lze poté vyjádřit jednoduchými operacemi s rovnicemi na tvar:

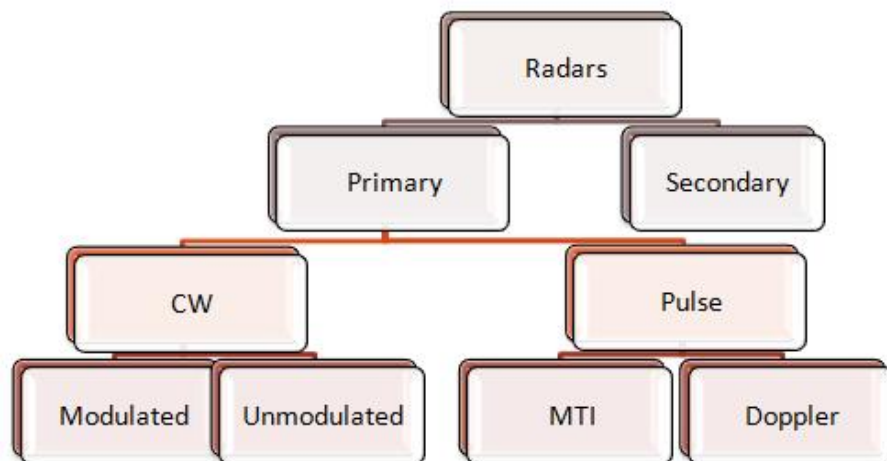
$$R_{MAX} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t \sigma A_e}{4\pi^2 SNR k T_0 (F - 1) BL}} \quad (2.5)$$

2.2.3 Rozlišení a přesnost

Rozlišení při měření určuje, jak blízko mohou být od sebe jednotlivé cíle, přičemž je lze od sebe odlišit. Tento pojem lze tedy spojovat se schopností odlišit sousedící objekty. Přesnost naopak definuje toleranci, s jakou je získání požadované informace (rychlosti, vzdálenosti, atd.) stále ještě korektní v dané aplikaci, pro jež je systém navržen. Přesnost tedy popisuje, s jakou relativní nebo absolutní chybou bylo měřeno.

Nepřesnosti měření jsou důsledkem [24]:

- Nekvalitní měřicí vybavení
- Kvantizační chyby
- Šum
- Zkreslení signálu



Obrázek 2.2: Základní dělení aktivních radarů.

2.3 Rozdělení radarů

Základní rozdělení radarů je na aktivní a pasivní. Aktivní mohou být primární nebo sekundární. Ty se dále dělí podle časové délky vysílaného signálu, dále také podle způsobu vysílání a podle způsobu snímání. Toto rozdělení je vyobrazeno na Obrázku 2.2 [8, 25].

2.3.1 Primární radar

Již první typy radarů patřily do této skupiny. Princip primárního radaru je založen na vysílání elektromagnetického vlnění, které může být vysíláno impulzně nebo kontinuálně. To se poté odráží od cíle a část se vrací k přijímací anténě. Tyto radary poskytují informace o poloze a rychlosti daného objektu. U tohoto typu není zapotřebí žádné spolupráce zachycovaného objektu. Většina současných radarů je právě tohoto typu [8].

2.3.2 Sekundární radar

Ke své funkci vyžaduje aktivní spolupráci sledovaného objektu na rozdíl od radarů primárních. Ta je založena na principu dotaz – odpověď. Radar vyšle elektromagnetický signál (dotaz) a čeká na reakci daného objektu. Nejčastěji se využívá v letovém provozu. Na letišti je tzv. dotazovač, tedy sekundární radiolokátor, který pravidelně zasílá letadlům signál. Na palubě letadla se nachází transponder (**transmitting responder**, což je odpovídač). Tento zašle odpověď v podobě speciálního kódu, který je mu přidělen řízením letového provozu. Tuto odpověď poté zachytí anténa sekundárního radaru a zpracuje získaná data. Ovšem tato odpověď může obsahovat mnohem více informací o sledovaném objektu než v případě primárních radarů. Používá se to mj. pro přesnou identifikaci objektu [5, 8].

2.3.3 Pasivní radar

Pasivní radar je speciální typ radaru, který nevysílá žádný signál. Ke své činnosti využívá změn v nejrůznějších elektromagnetických vlněních, které jsou součástí rozhlasových, televizních vysílačů, také mobilních telefonů, apod. Právě pomocí těchto, byť drobných změn, lze pomocí počítače určit polohu, rychlost a směr pohybu. Jeho výhoda spočívá v jeho ne-

detekovatelnosti. Ovšem pro získání kvalitních dat potřebuje více přijímačů. Jeho využití se nabízí např. ve vojenské technice [7, 8, 20].

Pro určení rychlosti a polohy se užívají různé metody:

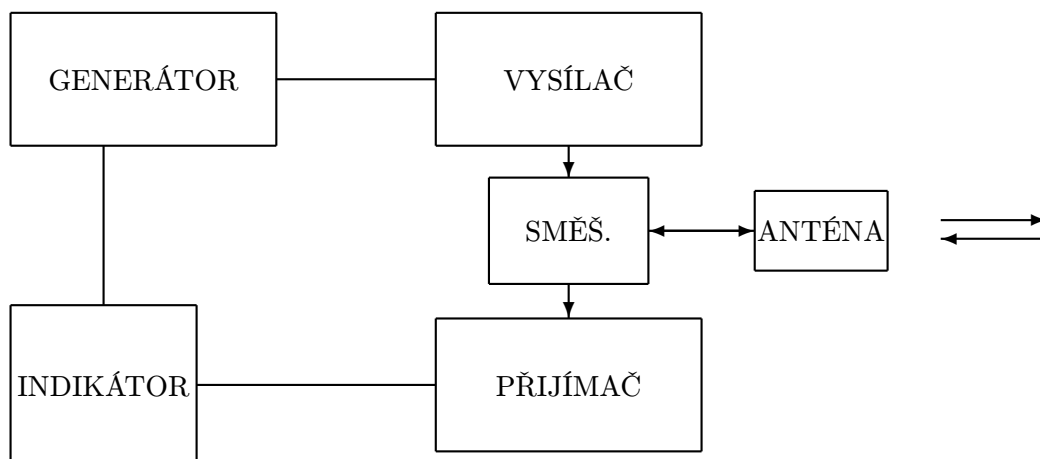
- **Směroměrné systémy** (DOA – direct of arrival) – pomocí několika přijímačů zjistí směr příchodu signálu a pomocí triangulace lze poté určit umístění zdroje tohoto signálu.
- **Časoměrné systémy** (TOA – time of arrival) – využívají měření času příchodu impulsu přijímaného signálu opět na více stanovišt a poté z časových rozdílů a také ze známé rychlosti šíření elektromagnetického vlnění určí dráhový rozdíl mezi vzdálenostmi, které musel signál urazit k jednotlivým stanovištím a pomocí známých poloh a vzdáleností mezi místy příjmu lze odvodit poloha zdroje.

2.3.4 Pulzní radar (Pulse radar)

Impulsní radar přenáší vysokofrekvenční impulsní signál s vysokým výkonem. Nejprve vyšle signál a poté se přepne do režimu čekání na odezvu. Doba tohoto režimu je delší než doba určená k vyslání impulsu. Až poté je vyslán další signál. Nevýhodou tohoto typu jsou tzv. slepé zóny, které vznikají v době vysílání impulsu, kdy je aktivní vstupní ochrana, která uzavře vstup přijímače. Vlny dopadající v této době nejsou tedy zpracovány. V případě pulzních radarů odpovídá extrakce informace o vzdálenosti objektu polovině časové prodlevy od vyslání pulzu a jeho návratu, což je značně jednodušší než v případě CW radarů. K výpočtu rychlosti je zde možné přistoupit dvěma způsoby. Dopplerovu frekvenci je buďto možné určit jako v případě radarů s kontinuálním vysíláním, jež je popsáno dále v textu, anebo lze získat rychlost pomocí rozdílu vzdálenosti objektů mezi jednotlivými pulzy. Rychlost lze tedy vyjádřit následovně $v = \frac{\Delta R}{\Delta t}$. Přesnost tohoto způsobu je přijatelná, pokud nedochází k drastickým změnám ΔR vzhledem k malému časovému úseku. Ve většině případů je radarový systém obsahující pulzní radar řádově dražší než systém s CW radarem [20, 25].

Rozdělení v závislosti na typu pracovního módu:

- **Moving target indication** (MTI) – je režim provozu radaru pro rozlišení pohybujícího se cíle. Výroba těchto typů radarů bývá mnohem složitější než u běžných CW nebo pulzních radarů. Tento systém je nutností při využití za účelem kvalitního dozoru nad vzdušným prostorem, kde je přítomno mnoho rušivých jevů. Byl předveden během 2. světové války, přičemž většina informací o zpracování byla definována v polovině padesátých let. Při jeho činnosti je využívána právě Dopplerova frekvence zachycená v impulsu navraceného signálu. Využívá vyslání dvou pulzů, kde k prvnímu navracenému přičte druhý signál, který je otočen o 180° . Tím se vyruší vlivy stacionárních objektů a zůstane informace o daném pohybujícím se cíli. Nicméně zde mohou vznikat tzv. slepé rychlosti, které se od skutečné rychlosti liší poměrně výrazným způsobem. To nastává u objektů v úhlech na hranicích detekce. MTI radary dále používají různé filtry pro odstranění šumu v závislosti na typu použití. Speciální typy jsou např. pro využití v meteorologii [16, 21].
- **Pulse-Doppler radar** (PD) – je 4D radar využívající opět Dopplerova jevu, který je schopen detekovat cílovou 3D polohu a její radiální rychlost. Radar posílá krátké impulsy rádiových frekvencí, které se od cíle částečně odráží.



Obrázek 2.3: Blokové schéma pulzního radaru [8].

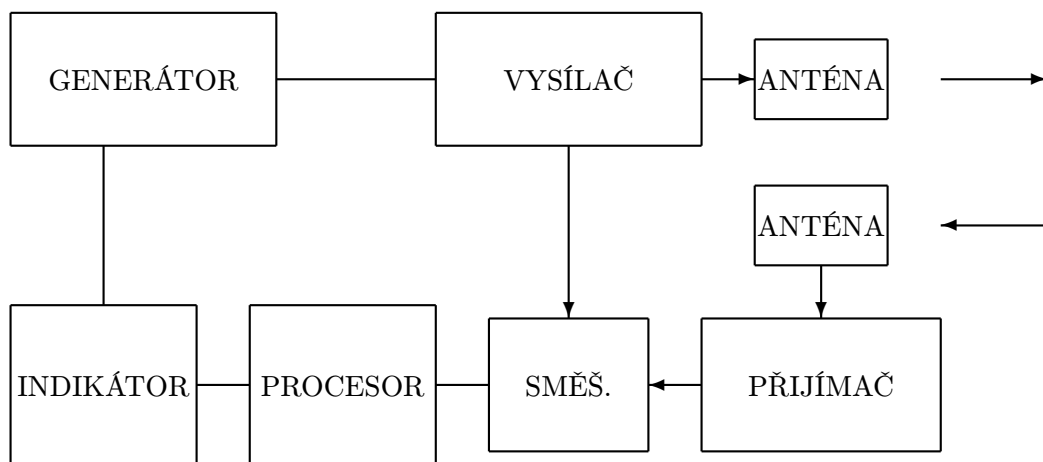
2.3.5 Radar s kontinuálním vysíláním (CW radar)

Signál je vysílán nepřerušovaně a stejně pak je signál odražený od objektu přijímán. Z toho plyne přítomnost alespoň dvou antén. Tyto moduly obsahují zesilovače, které odstraní ozvěny způsobené stacionárními objekty, dále zesílí odražený signál a tak usnadní zpracování a zobrazení dané Dopplerovy frekvence, o níž je signál odražený od objektu posunutý. Součástí může být i filtr např. FIR, který odstraní nízkofrekvenční části signálu. Tento typ radaru se většinou používá pouze pro vzdálenosti do několika kilometrů. Použití nejčastěji pro měření rychlosti vozidel [20].

- **Modulovaný CW radar** – přenášený signál má konstantní amplitudu a modulovanou frekvenci. Modulovaný radar se využívá, protože obyčejný CW radar není schopen měřit vzdálenost objektu, což je spojeno s relativně nízkou šířkou pásma přenášeného signálu. Aby bylo možné měřit vzdálenost, je nutné zavést časové značky. Právě tyto značky umožní označit čas vyslání signálu a rozpoznat čas jeho návratu. Velkou výhodou tohoto radaru je dostupnost výsledku měření. Signál je zpracováván bez přerušení a výsledek je proto celou dobu k dispozici. Tyto soupravy jsou využívány tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na vzdálenost a kde je nutné kontinuální měření (např. měření výšky v letadle). Tento radar lze také použít tam, kde by přenášený impuls byl příliš dlouhý k přesnému určení vzdálenosti. Používá se tedy ke zvýšení rozlišení [25].
- **Nemodulovaný CW radar** – přenášený signál má konstantní amplitudu i frekvenci. Nejlepších výsledků tento radar dosahuje při měření rychlosti.

2.4 Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu kmitočtu a tedy i vlnové délky přijímaného signálu vůči signálu vysílanému, která je způsobena nenulovou vzájemnou rychlostí přijímače a vysílače. Jev byl představen v roce 1842 rakouským vědcem Christianem Dopplerem. Tento známý jev lze pozorovat i v běžném životě, např. když se k nám přibližuje sanitka, mívá nás a poté se vzdaluje. Zvuk sirény, která vysílá signál o stále stejném kmitočtu, se v průběhu



Obrázek 2.4: Blokové schéma radaru s kontinuálním vysíláním [8].

jejího pohybu vůči nám mění. Námi přijímaná frekvence se během přibližování zvyšuje a v případě vzdalování tato frekvence klesá. Tento jev nenastává pouze u zvuku, ale lze ho obecně pozorovat i pro libovolné elektromagnetické vlnění (světlo, rádiové vlny, mikrovlny, atd.) [20].

Pohybuje-li se zdroj vysílacího signálu s frekvencí f_0 směrem od pozorovatele, platí pro pozorovatele přijímaná frekvence:

$$f = f_0 \frac{v}{v + v_{s,r}} \quad (2.6)$$

Pohybuje-li se zdroj vysílacího signálu s frekvencí f_0 směrem k pozorovateli, platí pro pozorovatele přijímaná frekvence:

$$f = f_0 \frac{v}{v - v_{s,r}} \quad (2.7)$$

Další změna frekvence může nastat, když jsou vlny zpětně rozptýleny (cíl se stává vysílačem v pohybu). Ve výsledku je dvojnásobný frekvenční posun (Dopplerův posuv) a lze ho vyjádřit [11]:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (2.8)$$

kde $v_r = v \cos \theta$ je relativní rychlost cíle k radaru, v je absolutní rychlost objektu, λ odpovídá vlnové délce vysílaného signálu radarem a θ je úhel mezi směrem cíle a středovou osou radarového paprsku.

2.5 Detekce úhlu pozice pozorovaného cíle

Úhel pozice cíle v přijímaném signálu hraje důležitou roli ve zpracování radarových dat, jelikož se zvyšujícím se úhlem mezi centrální osou radaru a objektem se snižuje přesnost naměřených hodnot. Běžné radiolokátory s jedinou přijímací anténou nemají tedy přímou možnost (lze ho ovšem detekovat pomocí mechanického otáčení modulu, apod.), jak jej zjistit. Výhodným způsobem, jak získat tuto informaci, je použití dvou a více přijímacích

antén a určování úhlu pomocí zpožděného signálu na jedné z nich. Vztah pro zjištění tohoto úhlu lze popsat následovně [11]:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \Delta \Phi}{2\pi d} \right) \quad (2.9)$$

kde λ je vlnová délka přijímaného signálu, $\Delta \Phi$ označuje fázový rozdíl mezi dvěma přijatými signály, d značí vzdálenost mezi anténami (liší se u každého modulu radiolokátoru, většinou je tato vzdálenost polovinou délky vlny nebo méně). Přesnost této techniky silně závisí na SNR (viz 2.4).

Kapitola 3

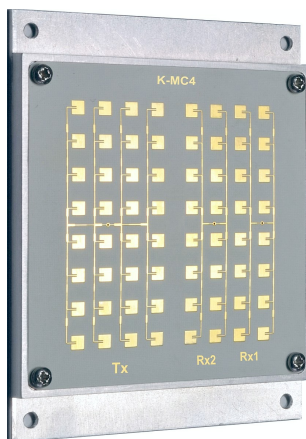
Měření pomocí CW radaru

V této kapitole bude popsán postup pro extrakci informace o objektu z přijatého radarového signálu. Dále budou detailněji popsány použité techniky a využitý hardware, pomocí kterého byla data zaznamenána.

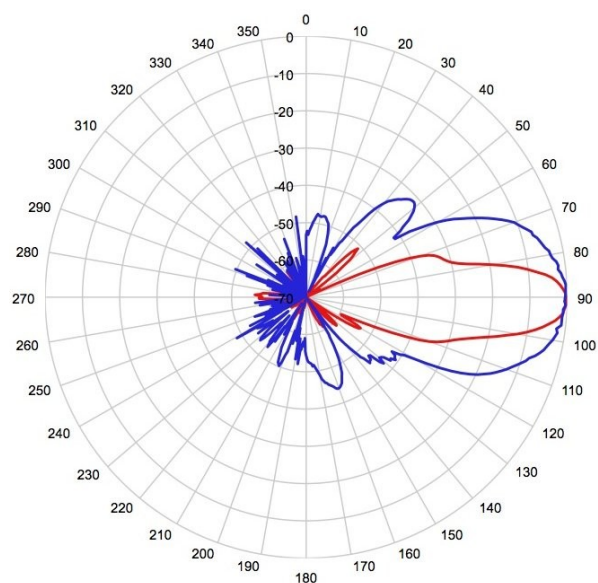
3.1 Použitý radar

Pro získání radarového signálu lze použít radar s kontinuálním vysíláním. Byl vybrán modul K-MC4 (viz Obrázek 3.1), což je dopplerův modul pro senzory s dlouhým dosahem. Obsahuje dva zesilovače signálu pro kanály I/Q. Nicméně lze využívat i nezesílený signál. Umožňuje také měření úhlu pohybujících se objektů. Součástí radaru je i funkce RSW (Rapid Sleep Wakeup) s velice rychlou dobou vzbuzení. Není tedy příliš energeticky náročný a v době nečinnosti je možné spotřebu snížit o 90% [15]. Je to malý a snadno přenositelný modul. Je tedy na snadě, že byl vybrán pro měření z důvodu jeho nízké ceny a jednoduchosti oproti radarům pulzním. Z toho vyplývá, že i výsledný vestavěný systém by měl být řádově levnější.

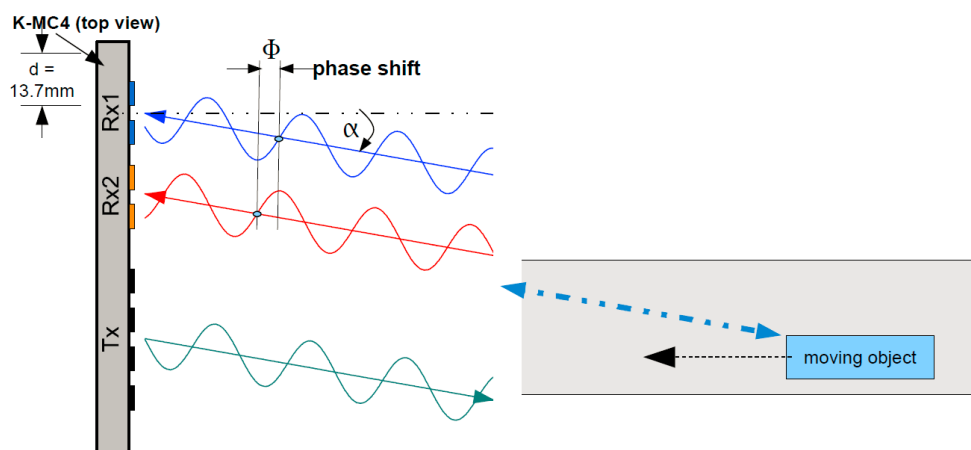
Přenáší signál o frekvencích mezi 24.050 GHz a 24.250 GHz v závislosti na VCO. Efektivitu modulu (sílu přijatého signálu) silně ovlivňuje úhel přijímaného signálu (Obrázek 3.2 ukazuje tuto závislost a zisk antény G_t ze vztahu 2.1). Nejlepších výsledků modul dosahuje, když je zisk antény vyšší než -3dB, což určuje tvar a šířku paprsku.



Obrázek 3.1: Radarový modul K-MC4. Rozměry $78 \times 98 \times 7\text{mm}^3$ [15].



Obrázek 3.2: Diagram K-MC4 modulu ukazující citlivost antény ve směru azimutu (modrá) a elevace (červená). Výsledná šířka svazku vysílaných paprsků $30^\circ \times 12^\circ$ [15].



Obrázek 3.3: Opožděný příjem signálu anténou Rx1 [15].

Pohybující se objekt vygeneruje Dopplerův posuv na obou kanálech I (imaginární složka) a Q (reálná složka) signálu. Mezi těmito kanály v závislosti na směru pohybu objektu vzniká fázový posuv. V případě cíle přibližujícího se k radaru, je posuv roven 90° mezi výstupem Ix a Qx. Je-li situace opačná, pak je generován posun -90° mezi Ix a Qx [15].

Jak již bylo řečeno, tento modul je dopplerovský a měření rychlosti je umožněno přímo výstupním signálem. Pro měření vzdálenosti je možné použít speciální techniky FSK (Frequency Shift Keying) nebo FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave). Tyto techniky budou popsány v dalších částech textu.

U běžných CW radarů s jednou přijímací anténou nelze detekovat úhlovou pozici cíle. K-MC4 toto ovšem díky dvěma anténám umožňuje. Je to výhodou např. při měření rychlosti vozidel. Vozidlo se přibližuje k radiolokátoru a v určité vzdálenosti úhel mezi centrální osou radaru a vozidlem nehraje při výpočtu rychlosti žádnou roli. Nicméně s přibližujícím se objektem se i mění tento úhel a přijatý signál je tlumený (viz Obrázek 3.3) a může způsobovat nepřesnosti při vyhodnocení rychlosti objektu. Díky zjištění úhlu lze poté jednoduše dopočítat nepřesnost způsobenou kosinovým faktorem. Výpočet úhlu viz 2.9.

3.2 Radarová data

Výstupem radaru je nízkofrekvenční signál, který se mění v čase v závislosti na odrazu vlnění od objektů. Jeho součástí není pouze frekvence námi sledovaného objektu, ale také frekvence všech objektů v rádiu antény radiolokátoru. Tato data v sobě uchovávají rychlost a směr každého objektu [10]. Cíl by v těchto datech měl obsahovat největší množství informace a toho je nutné využít pro analýzu technikami, které budou popsány níže. Jak již bylo řečeno modul K-MC4 zaznamenává data do dvou kanálů. Tedy vstupem pro analýzu signálu nebude pouze jeden výstup radarových dat, ale dva signály pro kanál I a Q [15]. Příklad radarového signálu je ukázán na obrázku 3.4.

3.3 Přípravení signálu

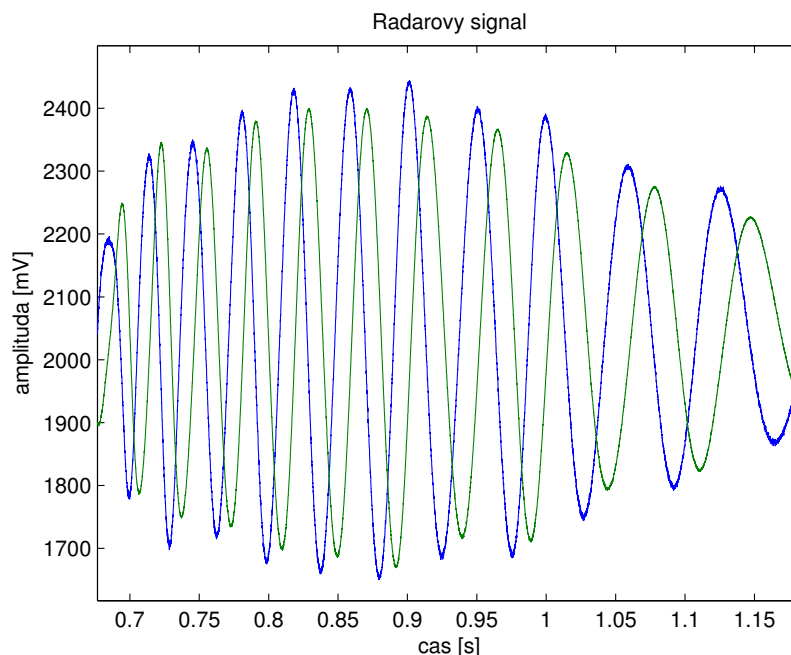
Důležitým krokem ke zjištění potřebných dat je frekvenční analýza. Nejprve je však nutné provést několik kroků k připravení signálu před získáním frekvenčního spektra.

3.3.1 Odstranění stejnosměrné složky

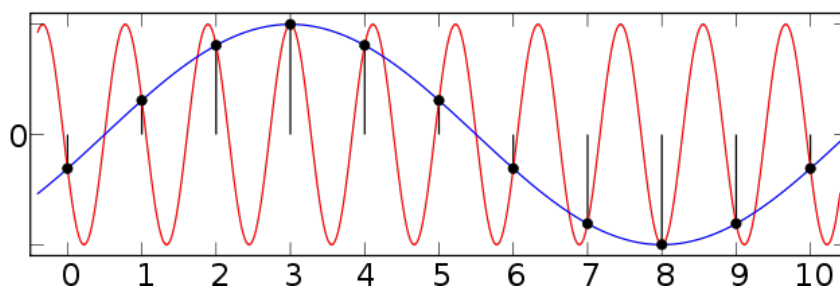
Prvním krokem je odstranění parazitních frekvencí a šumu ze vstupního signálu. Součástí signálu je také stejnosměrná složka (DC), kterou je nutné ze signálu odfiltrovat. Tato složka může být v signálu obsažena z důvodu nedokonalosti A/D převodníku, nebo samotný signál již mohl tuto složku obsahovat. Odstranění této složky je nutné, aby jí výsledky provedené frekvenční analýzy nebyly ovlivněny [21, 26].

Existují dva přístupy odstranění DC složky:

- **Blokové odstranění** – vyznačuje se odstraněním DC složky z určitého počtu vzorků (většinou je délka bloku pevně stanovená). V digitálním zpracování je odstranění provedeno odečtením průměrné hodnoty od každého prvku [11, 26].
- **Odstranění v reálném čase** – vhodné např. pro policejní radary, kdy je v radarovém modulu použit vhodný filtr (např. filtr IIR) [6]. V závislosti na jeho kvalitě poté zůstává v signálu buď extrémně nízká hodnota stejnosměrné složky nebo vůbec žádná.



Obrázek 3.4: Příklad komplexního radarového signálu, který naznačuje pohyb ruky před radarovým modulem.



Obrázek 3.5: Vznik aliasingu – dvě rozdílné sinusovky zapadají do stejné sady vzorků.

3.3.2 Rozdělení signálu

Pro zpracování je také vhodné zvolit určitou velikost rámce, který bude analyzován. Rámec je využit z důvodu rozdělení signálu na menší, jednodušeji zpracovatelné části. Hlavním důvodem tohoto rozdělení je požadavek, aby daný úsek byl stacionární (tedy v určitém čase neměnný). Velikost se obvykle volí v mocninách čísla 2 (tedy $2^8, 2^9, \dots$) [6]. Obecně lze říci, že čím menší bude velikost rámce, tím přesnější informace o objektu získáme. Je zde ovšem jisté omezení minimální velikosti. V rámci musí být obsažena alespoň jedna vlna frekvence, která nás zajímá. Ta se v našem případě liší podle rychlosti objektu. Proto volba velikosti rámce závisí na aplikaci, na níž bude měření použito. Pro zaznamenávání rychlosti vozidel je tedy vhodnější volit velikost rámce menší než pro detekci chodců. Radarový signál je digitalizován, což znamená, že při nahrávání dat do systému je ve vzorkovacích intervalech analogový signál převeden na sadu vzorků. Produkuje tedy sekvenci diskrétních čísel reprezentující hodnotu signálu v určitém čase. Tento vzorkovací systém tedy poté

omezuje rekonstrukci tohoto signálu pomocí vzorků bez vzniku aliasingu, tedy překrývání komponent frekvenčního spektra. Vzorkování nižší než je Nyquistova frekvence vždy způsobí aliasing, nicméně vzorkování vyšší nezaručuje operace bez vzniku aliasingu (viz obrázek 3.5). Tento teorém lze vyjádřit následující rovnicí [10, 21, 26]:

$$f_{vzork} > 2 \times f_{max} \quad (3.1)$$

3.3.3 Překrytí rámců

Další částí přípravy signálu je volba překrytí rámců. Existuje několik přístupů, z nichž nejvhodnější jsou následující: [26]

- **Malé nebo žádné překrytí** – zajišťuje rychlý časový posun v signálu, malé nároky na paměť/procesor, hodnoty parametrů se však od jednoho rámce ke druhému mohou hodně měnit [26].
- **Velké překrytí** – zajišťuje pomalejší časový posuv, ale jeho hlavní předností jsou “vyhlazené” průběhy parametrů. Tedy v případě radiolokátorů jsou získané rychlosti přesnější a častěji vyhodnocované, což může klást vyšší nároky na paměť a procesor.

3.3.4 Okenní funkce

Posledním krokem před provedením samotné frekvenční analýzy je vynásobení jednotlivých vzorků rámce speciálně tvarovanou okenní funkcí (tzv. Windowing). Tato technika se využívá ke zlepšení tvaru křivky signálu a minimalizaci vlivu nenavazujících hraničních vzorků, které mají za následek spektrální rozptyl po provedení FFT. Použití okna tedy zahradí signál na okrajích [10, 23].

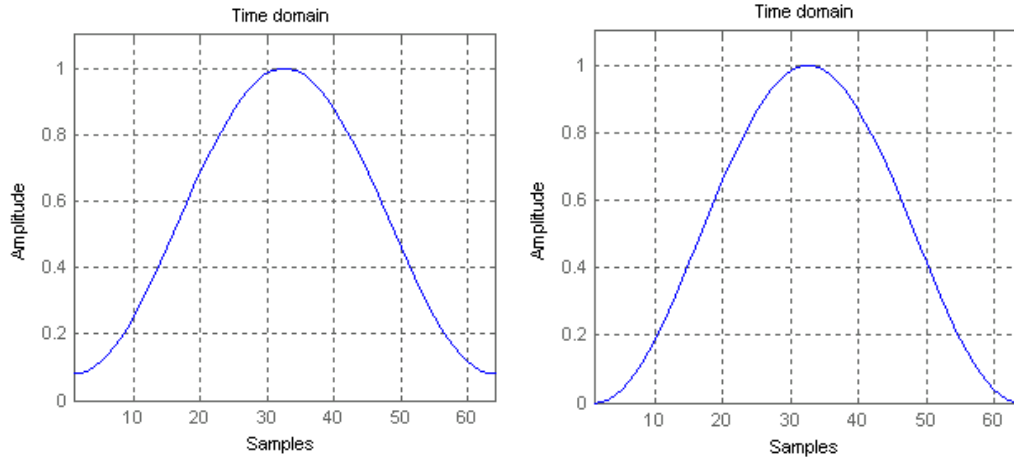
Okenních funkcí (viz Obrázek 3.6) je několik:

- **Obdelníkové okno** – někdy nazývané Dirichletovo okno, je nejjednodušším oknem. Jeho výsledky nejsou příliš vhodné pro zpracování radarových dat.
- **Hammingovo okno** – tzv. “vyvýšená kosinusovka”. Toto okno je optimalizováno, aby zvýraznilo hodnoty ve středu rámce a účinek postranních vysoce snížilo.
- **Hanningovo okno** – obdoba Hammingova okna s tím rozdílem, že krajní hodnoty jsou násobeny hodnotou nula.
- **Bartlettovo okno** – je trojúhelníkové okno s nulovými váhami na obou stranách.

Pro zpracování radarových dat je nejvhodnější použít Hammingovo nebo Hanningovo okno.

3.4 Frekvenční analýza

Frekvenční analýza je jádrem ve zpracování radarového signálu pro extrakci informace o rychlosti objektu. Nad námi připraveným signálem provedeme diskrétní Fourierovu transformaci (DFT). Jednou z možných metod je FFT (Fast Fourier Transform), což je co do zpracování rychlejší metoda a vykazuje stejné výsledky jako obyčejná Fourierova transformace [6, 9].



Obrázek 3.6: Tvary okenních funkcí (Hammingovo vlevo, Hannigovo vpravo) [12, 13].

Pro zvýšení rozlišení frekvenční osy je možné nad připraveným rámcem provést techniku zero-padding, která do daného segmentu signálu přidá nuly navíc a tím se zvýší počet frekvenčních binů (bodů) ve spektru po provedení DFT. Zvýšením rozlišení se “vyhladí” tvar křivky a zvýší přesnost získané frekvence [3]. FFT produkuje komplexní výstup, v němž vznikne v ideálním případě pouze jediný vrchol (výkonově nejsilnější složka pak odpovídá f_d). Jelikož je výstup z FFT komplexní, je vhodné nad spektrem vypočítat výkon a tím odstranit imaginární složku. Poté je odečtení frekvence s nejvyšší amplitudou z grafu velice snadné. A právě frekvence s největší amplitudou bude využita při výpočtu rychlosti objektu. Příklad výstupu z FFT, jak by mohlo vypadat frekvenční spektrum po přepočítání kmitočtových binů, je ukázán na Obrázku 3.7. Z něj lze vyčíst, že nejvyšší vliv na tvar křivky má kmitočet kolem 50 Hz.

3.5 Vyhodnocení rychlosti cíle

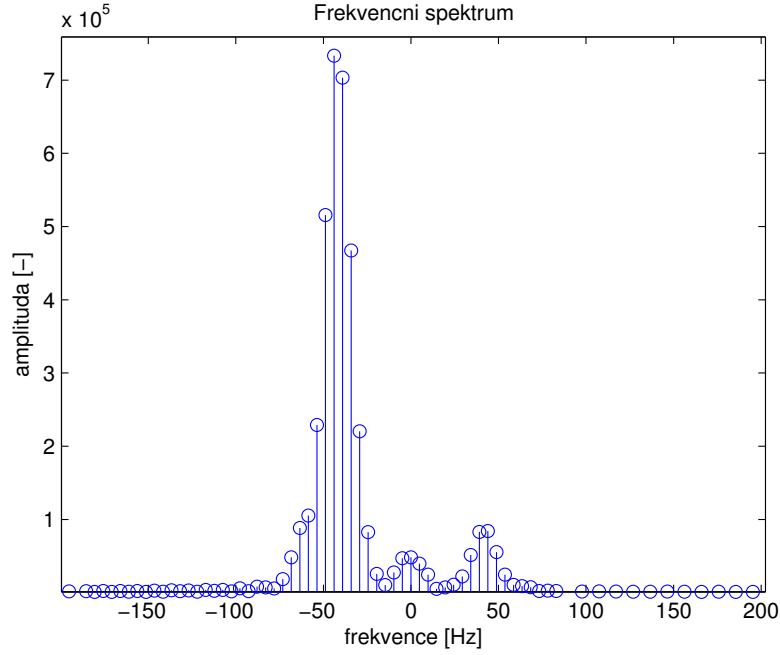
Jak již bylo řečeno, radary s kontinuálním vysíláním na svém výstupu generují Dopplerovu frekvenci, která odpovídá rychlosti měřeného objektu.

Z frekvenční analýzy tedy můžeme vyhodnotit Dopplerovu frekvenci f_d . Z dříve uvedeného vzorečku 2.8 lze jednoduchou úpravou odvodit vztah pro výpočet relativní rychlosti cíle:

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t} c \quad (3.2)$$

kde v_r je relativní rychlost objektu, f_t odpovídá vysílacímu kmitočtu radaru a c je známá rychlost světla (299 792 458 m/s).

Ovšem pro úplné zjištění rychlosti je nutné zjistit směr pohybu cíle (z důvodu, že výstupní frekvence nemohou být záporné). Směr lze zjistit v závislosti na fázovém posuvu kanálů I a Q, tedy smyslu otáčení komplexního výstupního signálu, který určíme přímo z frekvenčního spektra. Jak již bylo zmíněno, pohybuje-li se objekt směrem k radiolokátoru, pak fázový posun mezi I a Q je 90° a při vzdalování -90° [11].



Obrázek 3.7: Příklad frekvenčního spektra radarového signálu z obrázku 3.4 zobrazujícího různé hodnoty frekvenčních binů; Frekvenční vrchol je na $f = -50$ Hz, což odpovídá relativní rychlosti objektu $v = 1.12$ km/hod.

3.6 Úhlové měření a korekce

Úhel mezi směrem pohybu objektu a osou radaru může způsobovat nepřesnosti při měření rychlosti objektu. Tuto nepřesnost způsobuje faktor kosinového úhlu. Je-li úhel nulový, pak je přesnost měření nejvyšší (tedy $\cos 0 = 1$) a naopak, mívá-li objekt radar (úhel 90° tedy $\cos \frac{\pi}{2} = 0$). Tento úhel lze vyjádřit pomocí následující rovnice [19]:

$$\alpha = \tan^{-1}(d/R) \quad (3.3)$$

kde d je vzdálenost antény ke středu pruhu automobilového provozu a R je vzdálenost sledovaného objektu. Z toho vychází vzorec pro výpočet rychlosti vozidla:

$$v_{zmerena} = v_{realna} \times \cos \alpha \quad (3.4)$$

kde $\cos \alpha$ způsobuje chybu měření. Ovšem, v případě zjištění právě tohoto úhlu, lze tuto nevýhodu radarového modulu ošetřit pomocí korekce kosinového faktoru. Radarový modul K-MC4 obsahuje dvě přijímací antény a je tedy schopen určit námi hledaný úhel pomocí porovnání fází signálu z obou antén [15]:

$$\alpha = \frac{\Phi}{k} \quad (3.5)$$

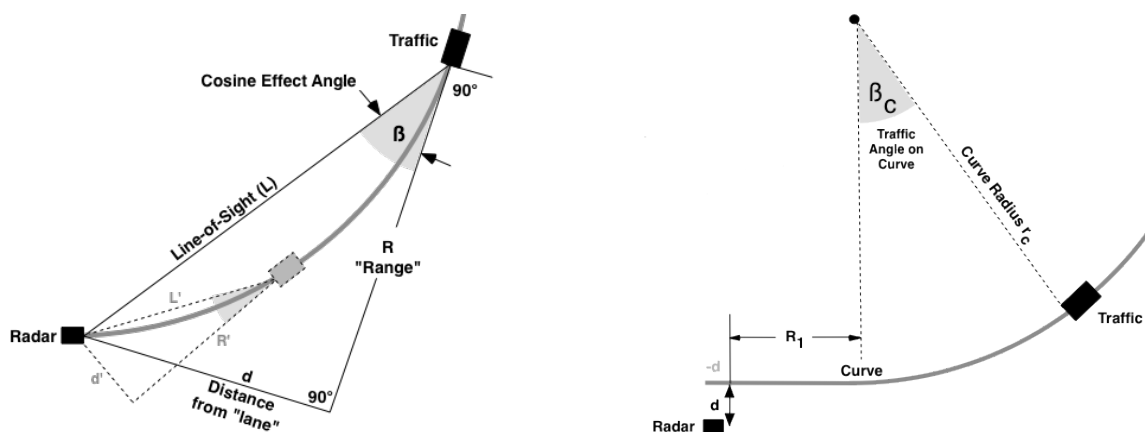
kde α je úhel ve stupních, Φ je posuv mezi kanálem I1 a I2 nebo Q1 a Q2, a konstanta $k = 6.7$. Korekci provedeme pouhou úpravou rovnice 3.4.

Nicméně, tento případ není jediná situace, při které může docházet k potížím při výpočtu rychlosti způsobenou kosinovým faktorem. Další situace [19]:

- **Overpass** – při sledování rychlosti vozidel v automobilovém provozu dochází k problému tzv. overpass (tedy minutí). V tomto případě je vestavěný systém umístěn vysoce nad úrovní vozovky i jedoucích vozidel a vznikají zde opět nepřesnosti, které je nutné ošetřit stejným způsobem.
- **Pohyb po křivce** – nastává v situaci, je-li vozidlo měřeno v zatáčce. Velikost chyby způsobené kosinovým faktorem bývá poměrně vysoká a mění se proporciálně k velikosti úhlu, její délce a rychlosti automobilu. I přes možnost výpočtu vzorce, pomocí kterého je možné chybu způsobenou tímto efektem zmírnit, se vestavěný systém pro toto použití na takovýchto umístěních nehodí a není tedy příliš využíván. Relativní rychlosti pohybu vozidla odpovídá:

$$v_r = v_0 \left(\sin 90^\circ - \beta_c + \tan^{-1} \frac{d + r_c(1 - \cos \beta_c)}{R_1 + r_c \sin \beta_c} \right) \quad (3.6)$$

kde v_0 je rychlost vozidla, β_c označuje úhel vozidla na křivce, r_c poloměr křivky (zatáčky), R_1 je vzdálenost radarového modulu od počátku křivky a d je vzdálenost radaru od středu pruhu pro vozidla. Situace je pro přiblížení vyobrazena na Obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Závislost kosinového faktoru v závislosti na úhlu při pohybu po křivce [19].

3.7 Techniky pro měření vzdálenosti

Radarový modul v módu měření Dopplerovy frekvence není schopen určit vzdálenost objektu a ani odhalit statický objekt. Pro toto měření je nutné využít modulaci signálu, které nám pomohou určit rozdíl časového kvanta mezi odchozím a příchozím signálem. A právě podle použité modulace se liší techniky měření vzdálenosti.

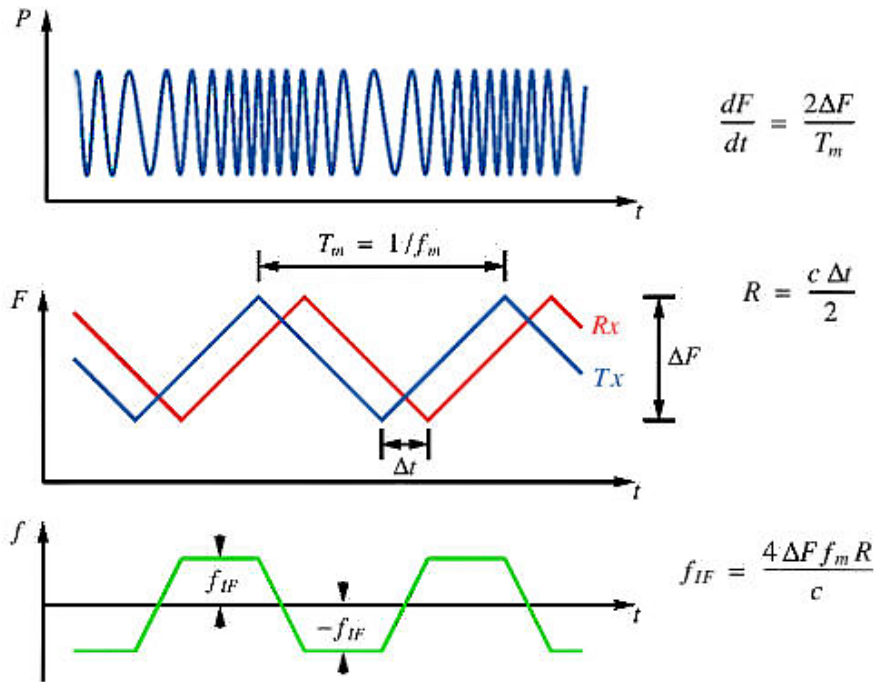
3.7.1 Lineární frekvenční modulace

Tato základní technika je velice jednoduchá. Radarový modul začne vysílat signál na frekvenci f_1 a poté dochází k periodickému snižování nebo zvyšování přenášené frekvence. Nelze periodicky měnit frekvenci vlny signálu pouze jedním směrem. Tvar přenášeného signálu

může být mj. sinusový, pilovitý nebo také trojúhelníkový viz obrázek 3.9. Na výstupu radarového modulu je poté generována odpovídající frekvence. Ovšem v době příjmu signálu radar vysílá na jiné frekvenci. A právě tento rozdíl poskytne dostatečnou informaci o délce časového kvanta mezi vysláním a příjmem modulovaného signálu. Vzdálenost lze poté vyjádřit následovně [10, 11]:

$$R = \frac{c_0 \Delta t}{2} = \frac{c_0 f_b \Delta f}{2 T_M} \quad (3.7)$$

kde c_0 je rychlost světla, Δt odpovídá rozdílu mezi časy vyslání signálu a jeho příjmu, f_b je frekvence označující frekvenční vrchol a poměr Δf – modulační šířka pásma, T_M – délka periody, určuje, k jak strmé frekvenční změně dochází při dané modulaci.



Obrázek 3.9: a.) Přenášený frekvenčně modulovaný signál; b.) Trojúhelníkový vysílaný (Tx) a přijímaný (Rx) signál, kde Δt odpovídá vzdálenosti objektu; c.) Vzdálenost lze poté vypočítat f_{IF} . Dopplerův posun lze určit pomocí získání frekvenčního vrcholu na sestupné/vzestupné hraně signálu (zelený signál) [1, 11].

3.7.2 Frequency Shift Keying

FSK je speciální technika, která využívá nejčastěji pouze dvě frekvence, mezi kterými je průběžně přepínáno. Na každou frekvenci je určené časové kvantum označené T_{CPI} , po které radarový modul vysílá tuto frekvenci. Rozdíl mezi použitými frekvencemi se označuje f_{step} a jeho velikost je volena dostatečně nízká v závislosti na maximální vzdálenosti pozorovaného objektu. Právě díky nízkému frekvenčnímu kroku lze nalézt Dopplerovu frekvenci na stejné pozici ve frekvenčním spektru, ovšem s rozdílným fázovým posunem. Tento posuv je poté využit při výpočtu dané vzdálenosti. Ta lze poté vyjádřit následovně [10, 11, 20]:

$$R = \frac{c_0 \Delta\varphi}{4\pi f_{step}} \quad (3.8)$$

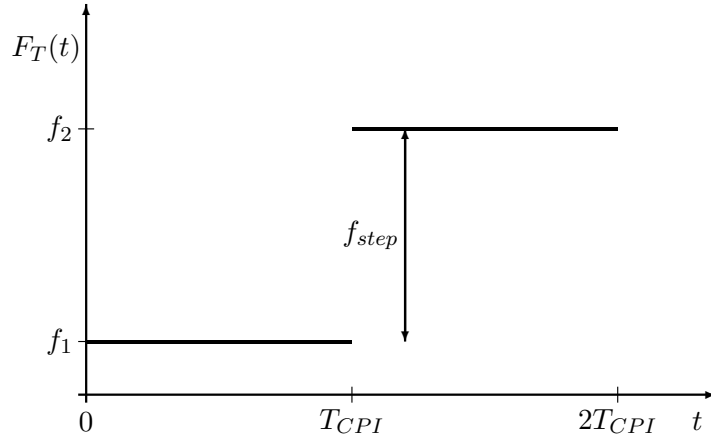
kde c_0 je rychlost světla (299 792 458 m/s), dále $f_{step} = f_B - f_A$ je použitý frekvenční krok, $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$ odpovídá fázovému posuvu na pozici Dopplerovy frekvence.

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (3.9)$$

Nicméně při tomto měření fázového posuvu je $\Delta\varphi$ přesná pouze, pokud nepřesahuje jeho hodnota 2π radiánů. Dosazením do vzorce 3.9 lze tedy zjistit maximální vzdálenost, kterou lze přesně určit, což odpovídá $R_{MAX} = \frac{\lambda}{2}$. V případě přenosu pouze jedné frekvence dosahuje maximální vzdálenost příliš nízkých hodnot, protože λ je vlnová délka odpovídající vysílané frekvenci. Zatímco při použití dvou frekvencí, vlnová délka je spojena s rozdílem těchto frekvencí a tím se dosáhne možnosti detekce objektu na mnohem větší vzdálenost.

Velikost kroku f_{step} určuje také přesnost, protože proporciálně k ní se mění velikost změny $\Delta\varphi$ na dané vzdálenosti. Nicméně je zde právě limit, který omezuje velikost tohoto kroku. Tím je právě $\Delta\varphi$, která nemůže přesáhnout 2π , aby určená vzdálenost byla jednoznačná [20].

Výhodou FSK je možnost současného měření rychlosti i vzdálenosti objektu. Nicméně pokud je objekt statický, pak není možné zachytit Dopplerovu frekvenci a není tedy možné určit ani vzdálenost cíle. Dalším problémem, který se u tohoto algoritmu může vyskytnout, je v případě většího množství vozidel v automobilovém provozu, které se pohybují stejnou rychlostí. Poté není možné určit, zda je námi naměřená Dopplerova frekvence určena správnému vozidlu. Pro ošetření těchto potíží je možné využít kombinace technik FSK a LFM (lineární frekvenční modulace) [11].



Obrázek 3.10: FSK modulace – použití dvou diskretních frekvencí [11].

Kapitola 4

Implementace aplikace

Cílem této kapitoly je navrhnout možné softwarové řešení měření rychlosti objektu pomocí radarových modulů K-MC1, K-MC4 [15] využívající Dopplerova jevu a techniky FSK, která byla zvolena pro získání povědomí o přesnosti a schopnosti použití této metody na tomto modelu radaru. Jsou v ní využité znalosti uvedené v předchozích částech textu a aplikovány v prostředí MATLAB a především C++ s využitím knihovny Qt.

4.1 Návrh v prostředí MATLAB

Pro ověření vlastností získaných informací a jednotlivých algoritmů zpracování signálu z uvedených zdrojů bylo využito prostředí MATLAB, jelikož poskytuje mnoho užitečných vestavěných funkcí.

4.1.1 Zpracování signálu bez použití modulace

V tomto případě je situace snazší o potíže spojené se synchronizačními bity, než je tomu při použití modulace. Zpracování je tedy poměrně přímočaré a prvním krokem je volba velikosti segmentu signálu pro přípravu našeho rámce ke zpracování. Úplně nejvhodnější by bylo automatické vyhodnocení délky alespoň jedné “vlny” signálu. Tohoto bude později využito pro aplikaci vytvořenou v programovacím jazyce C++ s využitím knihovny Qt. Zde postačí uživatelská volba vhodné velikosti rámce v závislosti na použití vestavěného systému a tedy typu měřeného objektu.

Nyní by měla být na řadě příprava signálu zmíněná v kapitole 3.3. Pro odstranění stejnosměrné složky ze vzorků segmentu signálu je možné využít funkce `mean`. Prostředí MATLAB poskytuje velkou nabídku již předpřipravených okenních funkcí využitelných pro zpracování signálu. Mimo jiné obsahuje i jednu z nejvhodnějších funkcí, což je `hamming`, která má pouze dva parametry ovlivňující její chod. Prvním z nich je délka rámce a druhým je tzv. `flag` – vlajka, kterou je vhodné pro účely spektrální analýzy a tedy následného využití FFT/DFT nastavit na stav `periodic` [12]. K uzavření přípravy signálu stačí už zajistit využití techniky zero-padding ke zvýšení přesnosti výsledku. Řešení nabízí `zeros`, jež doplní potřebné množství nul do připraveného rámce. Experimentálně ověřené množství použitých nul zero-paddingu pro poměrně vysokou přesnost příliš nezatěžující paměť/procesor je přibližně trojnásobek velikosti segmentu samotného signálu splňující Nyquistův teorém a rámec o velikosti mocniny čísla dvě.

Získání spektra za účelem nalezení frekvenčního vrcholu umožňuje `fft`, což je vestavěný algoritmus MATLABu. Jelikož radarový modul obsahuje dva kanály I a Q, lze FFT

aplikovat na jednotlivé kanály a poté porovnáním získávat potřebné informace. Nebo lze z těchto dvou kanálů udělat jeden komplexní vstup a výsledek není již nutné s ničím porovnávat. Tento druhý způsob je nejspíše efektivnější a jednodušší řešení. Vzhledem k tomu, že první polovina výstupu FFT odpovídá kladným hodnotám frekvence a druhá polovina odpovídá hodnotám záporným, pak je vhodné využít funkci `fftshift`, která přehodí tyto poloviny a spektrum se tak stane přehlednější. Pokud je použit pro vstup FFT právě jeden komplexní vstup, pak záporné/kladné hodnoty frekvenčního vrcholu určují směr pohybu objektu, který by za jiných podmínek musel být určován explicitně porovnáním fází jednotlivých kanálů. Pro získání rychlosti objektu už stačí pouhé přepočítání frekvenčních binů, získání frekvence získaného vrcholu a jeho dosazení do vzorce 3.2. MATLAB dále umožňuje vykreslení vstupních grafů a frekvenčních spekter, což značně uživateli umožní prohlédnout si samotné zpracování signálu.

4.1.2 Zpracování signálu s použitím diskrétní modulace

Vzhledem k tomu, že aplikace bude podporovat měření rychlosti signálu bez použití modulace i s použitím diskrétní modulace s přeskokem mezi frekvencemi, je nutné, aby byla schopna nalézt synchronizační bity určující vzorek, při kterém dochází k přeskoku. K tomu lze využít jednoduchého filtru, který nám zachytí vzorky větší než je hodnota 2^{15} , což je hodnota, kterou výstup radarového modulu nepřekročí v jiném případě než u vzorku se synchronizačním bitem. Řešení tohoto úkolu lze v prostředí MATLAB pomocí vestavěné funkce `find` v námi načteném segmentu signálu. Této funkci je nutné využít pouze v prvním segmentu. Poté lze již postupovat využitím známé vzorkovací frekvence a frekvence použité modulace. Pomocí těchto hodnot je možné nalézt počet vzorků, které oddělují jednotlivé synchronizační bity. Vztah využitelný k tomuto výpočtu je následující:

$$n = \frac{f_{sample}}{f_{modulation}} \quad (4.1)$$

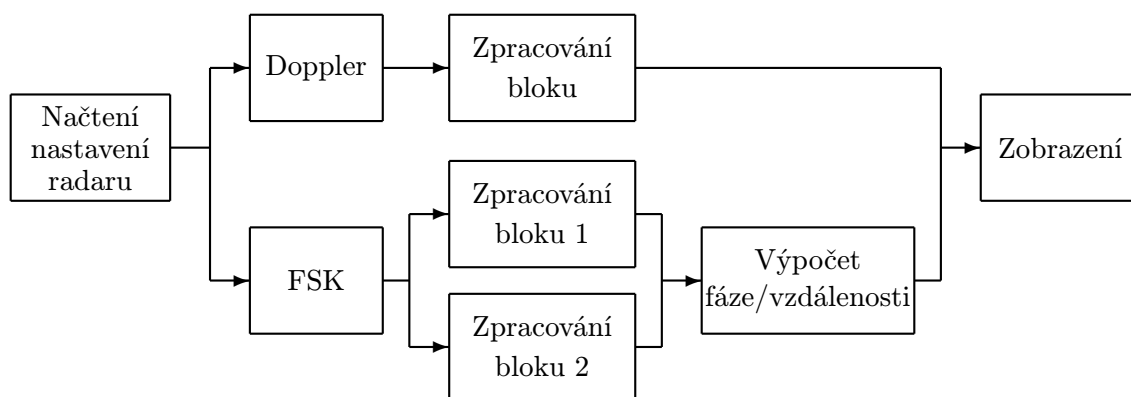
kde n je počet vzorků mezi přeskoky z jedné frekvence na druhou – v tomto případě z nižší frekvence na vyšší (hodnota $\frac{n}{2}$ označuje vzorek opačného přeskoku – tedy z vyšší frekvence na nižší), f_{sample} odpovídá vzorkovací frekvenci použité radarovým modulem pro uložení hodnot a $f_{modulation}$ je poté kmitočet modulace.

Před dalším zpracováním a načtením určitého bloku signálu je dobré si uvědomit, že pro zpracování lze použít pouze jednu z polovin časového úseku modulace, jelikož každý z těchto výstupů je diferencí jiných frekvencí. Dále vzorky nacházející se v blízkosti synchronizačního bitu jsou touto změnou značně ovlivněny, a proto není dobré tyto hodnoty dále využívat. Bude tedy načteno poměrně omezené množství vzorků a je tedy vhodné předem nastavit odpovídající modulační frekvenci vzhledem k omezení rozsahu detekovatelných frekvencí v závislosti na typu měřeného objektu a jeho předpokládaného rozsahu rychlosti pohybu. Jakmile se zvolí velikost rámce, pak se postupuje pro zjištění rychlosti pomocí stejného principu uvedeného pro zpracování signálu bez použití modulace.

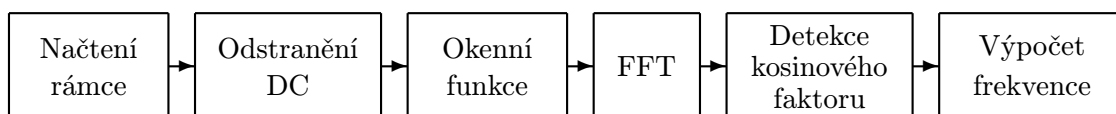
Postup při využití techniky FSK se poté liší pouze porovnáním hodnot získaných frekvencí z první a druhé poloviny periody frekvenční modulace a v případě jejich shody, která by v ideálním případě měla nastat téměř vždy, porovnat fázový posuv na pozici frekvenčního vrcholu a podle dříve uvedeného vzorce 3.8 získat vzdálenost objektu. Fázový posun lze zjistit pomocí `angle`.

4.2 Návrh v Qt

Implementačním jazykem bylo zvoleno C++ využívající knihovnu Qt. Pro výběr právě tohoto prostředí přispěli mj. znalosti získané během testování v MATLABu, dále také jeho rozšířenost a existence knihoven pro výpočet DFT. Pro své zpracování je využito všech algoritmů zmíněných u návrhu v prostředí MATLAB v kapitole 4.1. Na obrázcích 4.1 a 4.2 je navržené blokové zpracování signálu.



Obrázek 4.1: Analýza dat nahraných radarovým modulem.



Obrázek 4.2: Zpracování bloku signálu.

4.2.1 Požadavky na systém

I když byla aplikace vytvořena v programovacím jazyce C++ pod operačním systémem Ubuntu 12.04, tak by měla být přenositelná na jiné platformy splňující níže uvedené vybavení.

- **DFT/FFT** – využitá knihovna pro zpracování DFT se nazývá FFTW verze 3.3.3, která je zdarma dostupná na oficiálních stránkách <http://www.fftw.org>. Knihovna umí pracovat i ve více vláknech, což klade nároky na OS a jeho podporu sdílení paměti mezi vlákna. Tento balíček by měl být schopen pracovat na téměř všech variantách OS Unix a také na Win32.
- **Ploting** – vykreslení zpracovávaného signálu je zprostředkováno pomocí knihovny Qwt verze 6.0.2, která je šířena pod podmínkami QNU LGPL.
- **Real-time** – při měření real-time je nutné permanentní připojení radarového modulu k napájení a notebooku. Radar vydrží pracovat při použití přenosného zdroje napětí přibližně 20 hodin.

- **HW nároky** – aplikace by měla být schopná práce na průměrném hardwarovém vybavení dnešních PC bez menších potíží, přičemž nejvyšší nároky jsou kladeny na procesor/paměť. Testována byla na PC s HW vybavením: Intel Core i5 2430M (dvou-jádrový procesor s taktovací frekvencí 2.4 Ghz), 4GB DDR3 1333 MHz SDRAM.

4.2.2 GUI a ovládání

Aplikace by měla uživateli umožnit změnu velikosti analyzovaného rámce v případě, kdy výstup automatického algoritmu nevykazuje předpokládané hodnoty a nebo už jen z důvodu ověření závislosti přesnosti na délce vstupního segmentu a použité technice zero-padding. Je vhodné, aby implementace této schopnosti programu byla přehledná a především intuitivní na ovládání. Pro vytvoření byla tedy využita tlačítka `radio_button`, která umožňují přepínání mezi jednotlivými předpřipravenými nastaveními. Pro maximální variabilitu lze využít i položku umožňující zápis velikosti námi požadovaného rámce. K předejití nespokojenosti uživatele pramenící z nutnosti nastavovat příslušné hodnoty než se dostane k samotnému zpracování ručně, byla zde vložena položka počátečního stavu. Ta označuje automatické vyhodnocení a tedy žádnou účast ovládání osobou.

Přehrávání již dříve nahranych radarových dat je také možné zpomalit a umožnit tak jednodušší sledování jednotlivých výstupů. Implementovaný `vertical_slider` poskytuje několik rychlostí. Trvání je pak od doby úměrné zpracování algoritmu až k pomalejšímu zobrazení, než s jakým byla data nahrána real-time. Výstupy jsou poté náležitě upravovány pro vyšší přehlednost. Tzn. je-li analýza dat spuštěna nejvyšší rychlostí, pak jsou zobrazovány naposledy vypočítané hodnoty v daném časovém intervalu, naopak při nejmenší rychlosti aplikace ukazuje hodnoty zjištěné v aktuální čas bez jakýchkoliv úprav a je tedy zobrazeno více hodnot. K zobrazení hodnot je využita třída `QLCDNumber`.

Ačkoliv na LCD displeji jsou zobrazeny pouze některé hodnoty, tak všechny vypočítané hodnoty jsou ukládány do tzv. logu, který je možné pomocí tlačítka zobrazit a prohlédnout si dané výsledky. Tam je zapisována i difference mezi tím, zda se jedná o objekt nebo o pouhý šum. K vymazání nasbíraných výsledků je opět určené tlačítko `clear`.

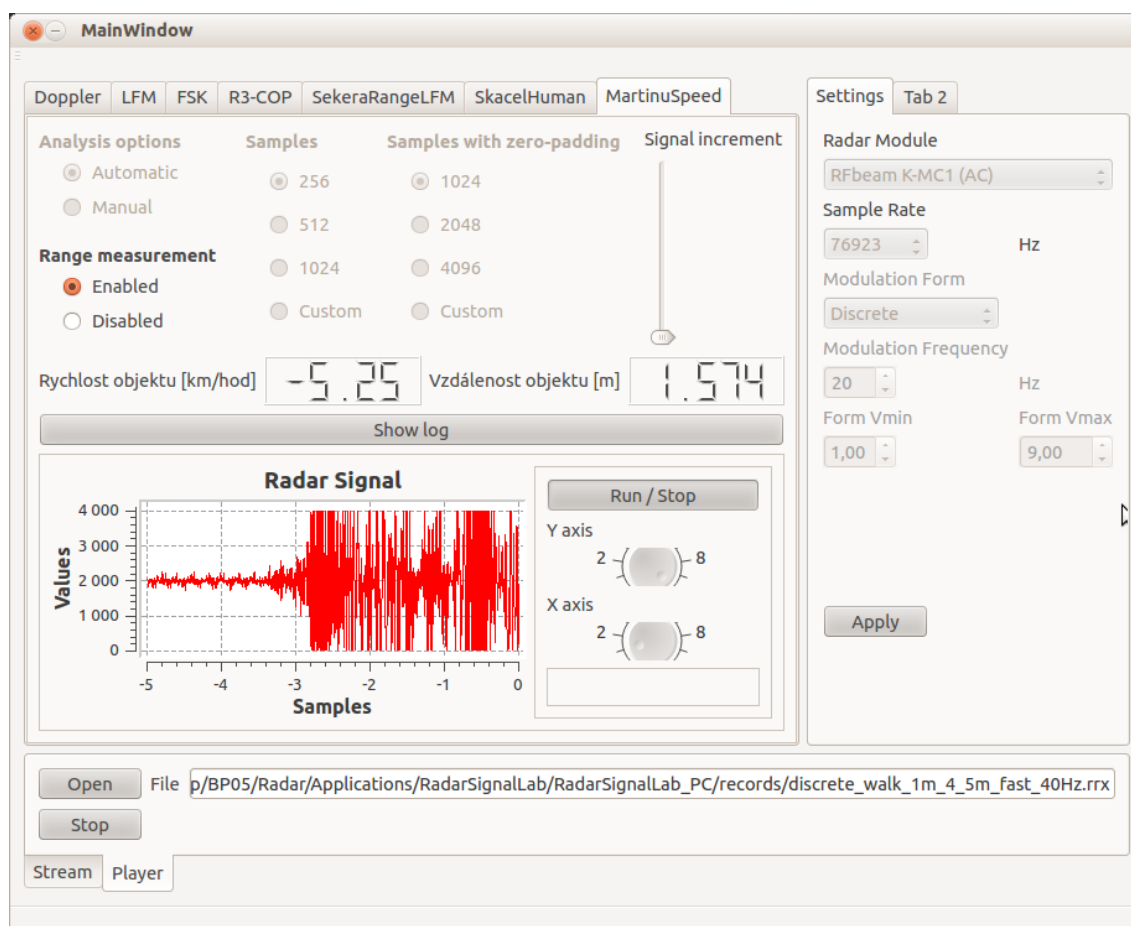
Navržená aplikace je ukázána za běhu při zpracování testovacího signálu na Obrázku 4.3 a 4.4.

4.2.3 Potlačení šumu

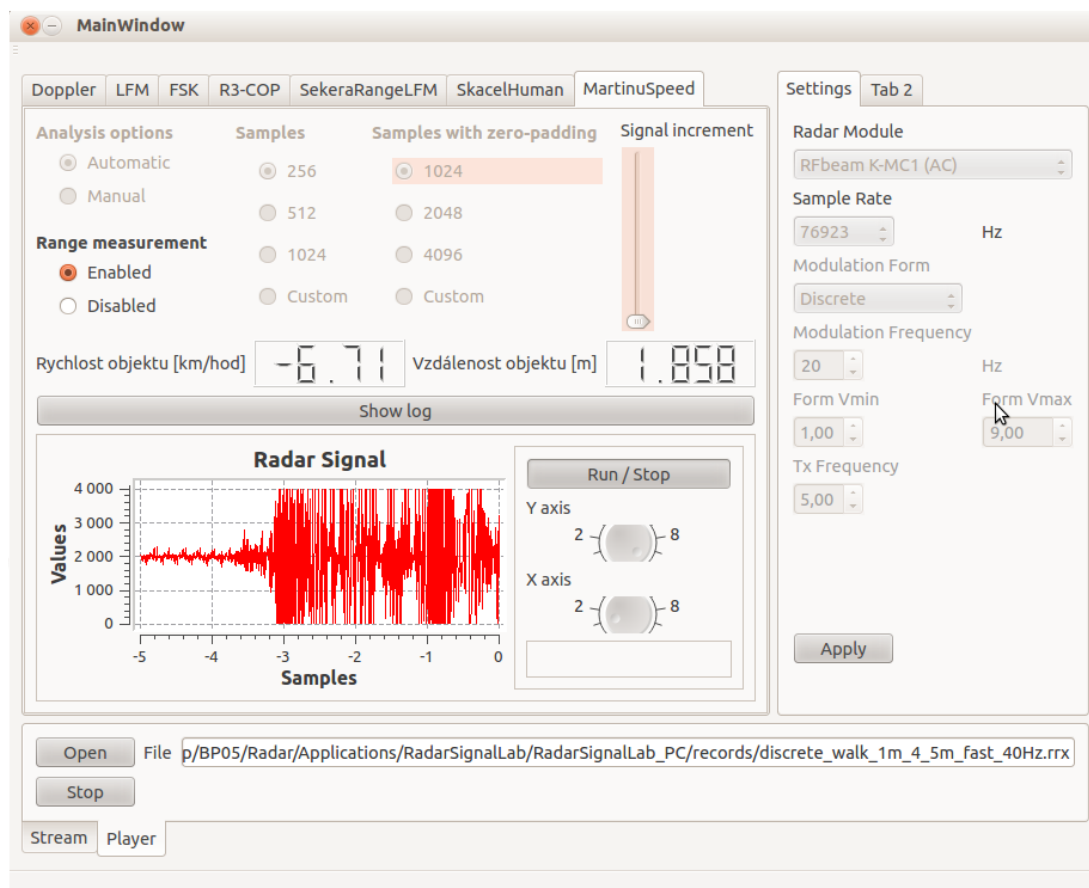
Důležitou součástí aplikace je také eliminace nepříznivým jevů na signál radaru. Součástí tohoto signálu je mj. mnoho vedlejších jevů, odrazů od různých objektů, které ve skutečnosti měřeny nejsou. Proto je vhodné toto rušení odfiltrovat.

Pro korektní odstranění těchto vlivů, lze předpokládat, že každá prudká změna Dopplerovy frekvence označuje tyto vlivy. Pro jejich eliminaci je tedy zvolen přístup, který detekuje změny frekvencí a porovnává je s přijatelnou šířkou pásma, s jakou lze ještě usoudit, že se jedná o stále stejný objekt. Pokud změřená hodnota nezasahuje do daného pásma, pak je hodnota ignorována. Ovšem může se stát, že prudká změna rychlosti znamená detekci jiného korektního objektu. Poté je nutné ukládat historii výsledků a podle té rozhodnout o zobrazení těchto hodnot. Při změně detekovaného objektu by se měla změnit šířka pásma korektních frekvencí.

Šum lze ve většině případů také nalézt ve frekvencích odpovídajících přibližně rychlosti 1 km/hod. Tyto hodnoty jsou také odfiltrovány.



Obrázek 4.3: Ukázka grafického rozhraní výsledné aplikace při zpracování radarových dat. Součástí signálu jsou informace o pohybu osoby směrem od modulu...



Obrázek 4.4: ... a jeho pokračování ukazující změnu vzdálenosti objektu od radarového modulu.

Kapitola 5

Vyhodnocení

Aplikace by měla být vhodná pro měření různých objektů ve vzdálenostech v závislosti na použitém radarovém modulu (K-MC1 – až 150 metrů, K-MC4 – až 93 metrů) s relativně přesnými hodnotami v oblasti měření rychlosti pohybu objektu. Při vyšších vzdálenostech se mohou vyskytovat potíže s rozeznáním více objektů od sebe, což zanechá chybu do výstupních dat. Je možné měření na dříve uložených datech, ale i real-time.

Algoritmus FSK nevykazuje příliš uspokojivé hodnoty na datech nahraných modulem K-MC4, což bylo otestováno v budově FITu na pohybu osoby v místnosti dlouhé 5 metrů. Na testovacích datech se vypočítané fázové posuvy lišily poměrně výrazným způsobem při minimální změně vzdálenosti objektu. Při detekci osoby vznikají potíže spojené s neuceleným pohybem objektu a tedy pohyb především rukou může způsobit změny ve změřené rychlosti pohybu objektu a poté je nutné odlišit tyto části těla.

Algoritmus sloužící k potlačení šumových hodnot dosahuje celkem zajímavých výsledků. Např. potlačení šumu v signálu obsahující pohyb osoby po místnosti vyfiltrovalo až 95% těchto hodnot přítomných v radarových datech. Výsledky v tomto případě jsou velice slušné. Naopak např. v signálu obsahující pohyb vozidel a několik dalších nestatických objektů, tak filtrace byla mnohem neúspěšnější a k potlačení šumu došlo pouze asi v 80% případech.

Přesnost použitých metod odpovídala teoretickým předpokladům jednotlivých měření. Velikost chyby a různé závislosti na počtech vzorků atd. jsou uvedeny níže v této kapitole.

5.1 Testování

Pro testy byly vybrány různé objekty z důvodu zajištění zisku, co nejpřesnějších výsledků pro dané měření. V nahraných datech se objevovalo poměrně vysoké množství šumu, které je nutné rozeznávat od opravdových pohybů nějakého objektu.

- **Dopplerův jev** – pro ověření korektnosti algoritmu zpracování signálu pouze pomocí Dopplerova jevu, byla nejprve nahrána data s pohybem jedné osoby, která se přemísťovala od radarového modulu až ke konci místnosti a poté obráceně. Na těchto datech lze poměrně dobře odhadnout předpokládaný výsledek rychlosti objektu a poté už jen porovnat s výsledky dosažené aplikací. Ověření správnosti získaného směru pohybu objektu je v tomto případě úplně základním testem.
- **FSK** – stejný postup jako u Dopplerova jevu, následoval i v případě experimentů s algoritmem FSK. Změna byla pouze v nastavení radarového modulu na vysílání signálu s přeskokem vysílací frekvence a tedy v uložených datech se objevila přítomnost

synchronizačního bitu oznamující změnu aktuální frekvence. Z testů poté vyplynulo pár problémů spojených s neuceleným pohybem objektu (potiže způsobovaly především pohyby rukou a nohou). Právě z tohoto důvodu je nutné v algoritmu detekovat prudké změny rychlosti a porovnávat fázi získaného vrcholu pouze na stejné hodnotě frekvence jako byla předchozí hodnota.

- **Kosinový faktor (Overpass)** – k řešení tohoto problému byla vybrána data obsahující pohyb vozidel pozorovaných z lávky FITu. Radarový modul byl připevněn pod úhlem 45° k jedoucím vozidlům. Díky tomu lze poté ověřit, zda získaný úhel srovnáním fází dvou kanálů např. I1 a I2, opravdu odpovídá skutečné hodnotě. Posledním krokem již byla korekce kosinového faktoru a poté porovnání opravdové rychlosti jedoucího vozidla a naměřené hodnoty. Došlo k velkému přiblížení získaného výsledku realitě.

5.2 Přesnost měření

Přesnost měření je ovlivněna mnoha faktory a také specifikaci, co je v danou chvíli měřeno. Podle měření lze tedy rozdělit důvody pro nepřesnosti do několika typů následovně:

- **Měření rychlosti** – ovlivnit výsledky lze v tomto případě velice dobře přímo pomocí software. První důležitým prvkem ovlivňující výsledek je velikost analyzovaného rámce. Zvolení příliš nízké velikosti nám omezí minimální možnou detekovatelnou rychlost, naopak volba vysoké velikosti způsobí nepřesnosti vlivem příliš dlouhého časového úseku, po který se mění rychlost pohybu objektu. Využití techniky zero-padding opět značně ovlivní přesnost. Obecně lze říci, že čím větší množství vzorků včetně zero-paddingu obsahuje rámec, tím větší přesnosti lze dosáhnout. Možné nepřesnosti způsobené tímto faktorem jsou uvedeny v tabulce 5.1. Vzorec pro výpočet velikosti této chyby lze odvodit ze vztahu 3.2:

$$\Delta v = \frac{f_{sample}}{N} \frac{c}{2f_T} \quad (5.1)$$

kde Δv je velikost chyby v m/s, f_{sample} je vzorkovací frekvence, N odpovídá počtu vzorků na rámec, c je rychlost světla a f_T frekvence přenášená radarovým modulem. Poměr f_{sample} a N odpovídá granularitě frekvence ve spektru. Z tohoto vztahu lze tedy snadno odvodit závislost možné přesnosti řešení na vzorkovací frekvenci a počtu vzorků na rámec.

Pomocí hardware lze ovlivnit přesnost a především možný rozsah naměřených hodnot pomocí nastavení vhodného vzorkování dat radarového modulu. Samozřejmě také prostředí a jeho rušivé jevy způsobují anomálie při zpracování. To lze omezit použitím vhodného hardwarového/softwarového filtru. Potiže také mohou nastat v případě, že je použita modulace s přeskokem mezi frekvencemi viz 3.7.2.

| | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Počet vzorků signálu (+zero-padding) | 512 (+512) | 512 (+1536) | 1024 (+1024) |
| Chyba získané rychlosti [km/hod] | ± 0.436 | ± 0.218 | ± 0.218 |

Tabulka 5.1: Závislost chyby měření na počtu vzorků; Data byla vzorkována frekvencí 20000 Hz, což značně ovlivňuje přesnost a také rozsah získaných frekvencí a tedy i rychlosti.

- **Měření rychlosti pod úhlem** – pro toto měření platí stejné chyby jako v případě měření rychlosti a také navíc ty způsobené kosinovým faktorem, které jsou popsány výše viz 3.6. V tabulce 5.2 je navíc ukázána její velikost.

| | | | | | |
|-----------------------------|---|------|------|----|-----|
| Úhel [°] | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 |
| Chyba získané rychlosti [%] | 0 | 13.4 | 29.3 | 50 | 100 |

Tabulka 5.2: Závislost chyby měření na velikosti úhlu bez použití korekce kosinového faktoru.

- **Měření vzdálenosti** – při použití techniky FSK je dobré zvolit vhodnou velikost frekvenčního kroku kvůli omezení maximálního možného dosahu ze vztahu 3.9. Tu je možné nastavit hardwarově přímo na radarovém modulu. I v tomto případě má na výsledek vysoký vliv počet vzorků na rámec. Situace je poněkud obtížnější než u měření rychlosti, ale i přesto lze využít vzorec 5.1, do kterého je nutné zavést možnost chyby způsobené získáním nepatřičné velikosti úhlu vzhledem již k možné nepřesnosti dané rychlosti.

Kapitola 6

Závěr

Měření lze tedy provádět pomocí různých radarových modulů. Pro naměření hodnot a otestování systému byl vybrán modul K-MC4, který splňuje základní požadavky a dále také umožňuje měření úhlu mezi objektem a osou radaru pomocí dvou přijímacích antén. Hlavním z důvodů, proč byl zvolen tento modul, je především jeho cena a schopnost uložení naměřených hodnot do paměti a přenesení těchto dat do osobního počítače. Mezi jeho drobné nevýhody lze zařadit jeho maximální dosah, jenž činí pouhých 93 metrů pro pohybující se automobil a 37 metrů pro osobu.

Po získání povědomí o zpracování signálu a způsobech určení rychlosti objektu (1. bod zadání), které jsou uvedeny v první polovině textu, byl pro implementaci software zvolen algoritmus využívající Dopplerův jev (2. bod zadání) a navíc technika FSK umožňující měření vzdálenosti zároveň s rychlostí. Návrh a implementace algoritmu je uvedena v kapitole 4 (3. bod zadání). Ten byl poté otestován na řadě radarových dat viz kapitola 5 (4. bod zadání), které odpovídají situacím běžného života. V té jsou také uvedeny výsledky a v závěru práce 6 jsou uvedeny pozitiva i negativa aplikace. Na úplný závěr je uvedeno možné pokračování práce (5. bod zadání). Podle výsledků lze říci, že je schopna měřit téměř jakékoliv objekty nacházející se v dosahu radaru.

Navržená aplikace umožňuje různé použití pro lišící se situace. Vzhledem k velkému vlivu přesnosti na použitých vlastnostech analýzy signálu je proto zvolena možnost přechodů mezi nastaveními a vlastního nastavení, díky které je aplikace “šitá na míru” některým okolnostem. To jest také závislost na fyzickém vybavení stroje, na kterém je aplikace spuštěna. Při použití vlastností pro získání větší přesnosti je pak více zatížena paměť/procesor.

Výsledky, jež by měla aplikace dosahovat v automobilovém provozu, by měly být dostatečně přesné a chyby by neměly mít v tomto použití příliš velký vliv. Ne úplně ideálních vlastností může aplikace dosahovat ve velice nízkých rychlostech, malých vzdálenostech objektů, kde je požadovaná přesnost na centimetry/milimetry. Při použití v takovéto situaci by tedy bylo vhodné použití jiného radarového modulu/vestavěného systému a také software, který zpracovává daný signál.

V další práci by se dalo výrazně zapracovat na odstranění problémů s FSK. Taktéž by aplikace mohla být schopna detekovat nejen obyčejný problém s kosinovým faktorem, ale i potíže overpass a pohyb po křivce. Přístup k těmto korekcím by bylo možné vylepšit. Detekce objektů/šumu by v pokračování mohla obsahovat delší historii výsledků určitého objektu. Tím by bylo možné zpřesnit detekci těchto jevů až ke 100%, kterých prozatím nebylo dosaženo. Rovněž by aplikace dále mohla rozlišovat větší množství objektů.

Literatura

- [1] MMW & EPR Group, Radar. [online], 2012 [cit. 2013-4-9].
URL <http://www.st-andrews.ac.uk/~mmwave/mm-waves/avtis/theory-mmw-imaging/radar/>
- [2] Electron tube. [online], [cit. 2013-1-12].
URL <http://media-1.web.britannica.com/eb-media/05/205-004-F27EDE44.jpg>
- [3] Alan V. Oppenheim, R. S.: *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall PTR, New Jersey, 1989.
- [4] Daintith, J.: *Biographical Encyclopedia of Scientists*. CRC Press, třetí vydání, 2008, iISBN 1420072714.
- [5] Franceschitti, G.; Lanari, R.: *Synthetic aperture radar processing*. CRC Press, 1999, iISBN 0849378990.
- [6] Haykin, S.; Veen, B. V.: *Signals and Systems*. John Wiley & Sons, druhé vydání, 2003, iISBN 0471-37851-8.
- [7] Krystlík, T.: Nová technologie - pasivní radar. *CS magazín*, 12 2003.
- [8] Kusala, J.: Z historie radaru. [online], 2008 [cit. 2013-1-12].
URL http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/obsah.htm
- [9] Lyons, R. G.: *Understanding Digital Signal Processing*. Prentice-Hall PTR, New Jersey, 2001, iISBN 0-201-63467-8.
- [10] Mahafza, B. R.: *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. CRC Press, 2000, iISBN 1-58488-182-8.
- [11] Maršík, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. Thesis statement, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology, 2012-1-20.
- [12] MathWorks: Hamming window. [online], 2013 [cit. 2013-4-9].
URL <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/hamming.html>
- [13] MathWorks: Hann Window. [online], 2013 [cit. 2013-4-9].
URL <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/hann.html>
- [14] Meischner, P.: *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*. Springer, druhé vydání, 2005, iISBN 3540003282.

- [15] RFbeam Microwave GmbH: *K-MC4 Monopulse Radar Transceiver*. 2011.
- [16] Richards, M. A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, New York, 2005, iISBN 0-07-144474-2.
- [17] Richards, M. A.; Scheer, J. A.; Holm, W. A.: *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. SciTech Publishing, New York, 2010, iISBN 9781891121524.
- [18] Ridenour, L. N.: *Radar System Engineering*. McGraw-Hill, New York, první vydání, 1947.
- [19] Sawicki, D. S.: *Police Traffic SPEED RADAR Handbook*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011, iISBN 1456524283.
- [20] Skolnik, M. I.: *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill, New York, druhé vydání, 1980, iISBN 0-07-066572-9.
- [21] Skolnik, M. I.: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York, třetí vydání, 2008, iISBN 978-0-07-148547-0.
- [22] Straw, R. D.: *Arrl Handbook for Radio Communications 2006*. The American Radio Relay League, 83 vydání, 2005, iISBN 0-87259-929-9.
- [23] Weisstein, E. W.: *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*. CRC Press, druhé vydání, 2002, iISBN 1-58488-347-2.
- [24] Wiesbeck, W.: *Radar System Engineering*. Textbook, Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, 2008/2009.
- [25] Wolff, C.: *Radartutorial*. [online], 2011 [cit. 2013-4-9].
URL <http://www.radartutorial.eu>
- [26] Černocký, J.: *Zpracování řečových signálů*. Učební text, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology, 2006-12-6.

Příloha A

Obsah CD

- **Technická zpráva (pdf)** – MereniRychlosti.pdf
- **Technická zpráva (zdrojové texty)** – czechiso.bst, desky.tex, fitthesis.cls, literatura.bib, Makefile, obsah.tex, prilohy.tex, projekt.tex
fig – fit-zp2.eps, fit-tp2.pdf, vut-zp2.eps, vut-zp2.pdf
img – ukazkaApp.png, pokrac2.png, aliasing.png, curve.png, curve-noangle.png, figure_freq_spectrum.pdf, figure_radar_signal.pdf, graf.png, graf-mc4.png, graph.png, hammingovo2.png, hanningovo.png, k-mc4_real.png, magnetron.jpg, MMW_FMCW.png, player.png, posuv.png, record.png, settings.png, Types-of-RADAR.jpg, log.png
- **Dokumentace** – dokumentace.pdf
- **Zdrojové texty programů** – AppMartinuSpeedProc.cpp, AppMartinuSpeedProc.h, AppMartinuSpeedWidget.cpp, AppMartinuSpeedWidget.h, AppMartinuSpeedWidget.ui, RadarSignalLab.pro, a další soubory, které jsou součástí připravené části aplikace vedoucím práce.
records – discrete_walk_1m_4.5m_fast_40Hz.rrx, discrete_walk_1m_4.5m_slow_40Hz.rrx, discrete_calibration_40Hz.rrx, base64decode.m, rrxread.m, carsss.rrx, car1.rrx, car2.rrx, car45.rrx, car6.rrx, car7.rrx, car890.rrx, 5cars.rrx

Příloha B

Manual

B.1 Návod na instalaci

Aplikaci lze spustit v prostředí Qt Creator splňující níže uvedené požadavky. Potřebné balíčky Qwt se po nainstalování v prostředí OS linux většinou automaticky propojí s Qt. Pokud se tak nestane, je nutné do souboru RadarSignalLab.pro doplnit následující řádky:

```
CONFIG += qwt
```

```
INCLUDEPATH += CESTA_K_POTREBNEMU_BALICKU_QWT/include
```

```
LIBS += -lfftw3
```

```
LIBS += -L/CESTA_K_POTREBNEMU_BALICKU_QWT/lib -lqwt
```

Požadované balíčky:

- **DFT/FFT** – musí být nainstalovaná knihovna pro zpracování DFT – **FFTW verze 3.3.3**, která je zdarma dostupná na oficiálních stránkách <http://www.fftw.org>.
- **Ploting** – vykreslení zpracovávaného signálu je zprostředkováno pomocí knihovny **Qwt verze 6.0.2**, která je šířena pod podmínkami QNU LGPL.
- **HW nároky** – aplikace by měla být schopná práce na průměrném hardwarovém vybavení dnešních PC bez menších potíží, přičemž nejvyšší nároky jsou kladeny na procesor/paměť. Testována byla na PC s HW vybavením: Intel Core i5 2430M (dvoujádrový procesor s taktovací frekvencí 2.4 Ghz), 4GB DDR3 1333 MHz SDRAM.

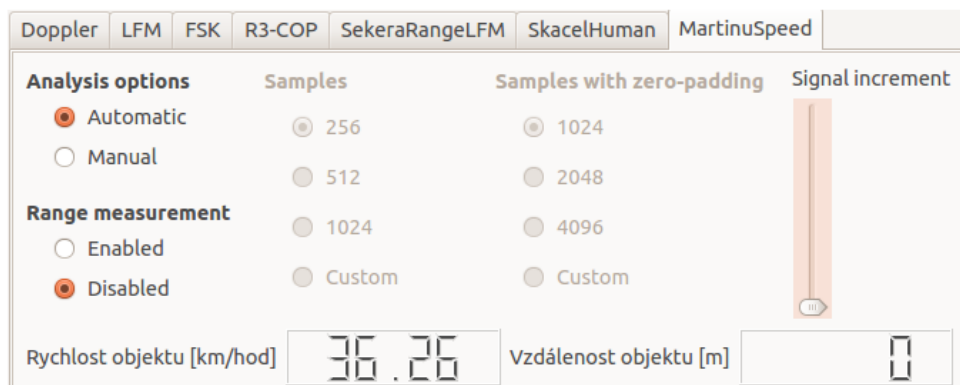
B.2 Ovládání aplikace

Po spuštění je navržena aplikace pod záložkou MartinuSpeed.

B.2.1 Nastavení zpracování signálu

Ve výchozím stavu je aplikace nastavena pouze na měření rychlosti s využitím automatického algoritmu pro určení velikosti zpracovávaného rámce.

Pro ukázkou závislosti přesnosti na počtu vzorků signálu a použité techniky zero-padding je v panelu možné uživatelské nastavení. Toto nastavení je vhodné provést před spuštěním aplikace nad konkrétním signálem. Pro uživatelské nastavení je nutné zaškrtnout



Obrázek B.1: Ukázka možného nastavení zpracování signálu a zobrazení hodnot na LCD displejích.

v části **Analysis options** pole **Manual** a poté se zpřístupní volby v částech **Samples** a **Samples with zero-padding**. V těchto částech lze libovolně nastavovat počet vzorků. Položka **Custom** umožňuje libovolné nastavení téměř jakékoliv hodnoty (splňující podmínky – počet vzorků je mocninou čísla 2 a nejmenší povolená hodnota je 256, nejvyšší povolená hodnota $2^{15} = 32768$, což je omezení kvůli rychlosti zpracování).

Dále je zde umožněno zrychlovat/zpomalovat vykreslování a zpracování signálu. K tomu slouží část **Signal increment**. Výchozí hodnota je nejpomalejší zpracování. Pro zvýšení rychlosti je určen vertikální posuvník, který s každým posuvem směrem vzhůru, zvýší rychlost zpracování signálu.

Poslední část záložky **Range measurement** pouze zpřístupní možnost měření vzdálenosti, pokud to zpracovávaný signál dovoluje. Tlačítko **Enable** umožní toto měření, ale uzamkne možnosti manuálního nastavení. Naopak **Disable** znemožní měření vzdálenosti a zpřístupní **Analysis options**.

B.2.2 Zobrazení výsledků

K zobrazení naměřených hodnot je využit LCD displej. Hodnoty na tomto displeji ukazují poslední hodnoty rychlosti pohybu objektu v daném čase v závislosti na rychlosti zpracování signálu. Pro zobrazení přesných hodnot lze využít tlačítka **Show log**, který zobrazí výsledek v určitém rámci a rozezná ho od šumu a sledovaného objektu. Pro zobrazení pole **Settings** a LCD displejů je v případě aktuálního zobrazení logu nutné využít tlačítka **Show display**. Pro vymazání vypočtených hodnot z historie logu stačí stisknout tlačítko **Clear**.

Pod těmito displeji pro měření rychlosti a vzdálenosti je umístěn graf ukazující tvar signálu radarového modulu. Zaškrtnutím jednotlivých kanálů se přidává zobrazení daného kanálu.

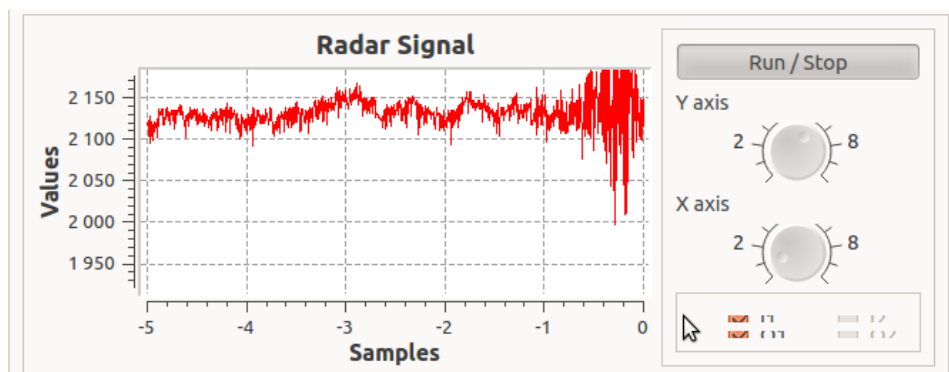
B.2.3 Otevření záznamu a nahrávání dat

Pod grafem je v záložce **Player** položka **Open** a **Play**, které umožňují otevřít a přehrávat již uložený záznam viz Obrázek B.4.

Záložka **Stream** umožňuje nahrávání záznamů a poté určení cesty, kam se mají data uložit. Na Obrázku B.5 je ukázka tohoto panelu, kde ovšem není umožněno nahrávat data, protože není připojen radarový modul.

| Show display | | | |
|--------------|----------------|-----------|-------------|
| | Speed (km/hod) | Range (m) | Object type |
| 165 | 57.0904 | 0 | Object |
| 166 | 57.399 | 0 | Object |
| 167 | 62.0279 | 0 | Object |
| 168 | 56.4732 | 0 | Object |
| 169 | -1.54341 | 0 | Noise |
| 170 | 54.0044 | 0 | Object |
| Clear | | | |

Obrázek B.2: Ukázka logu zobrazující signál obsahující pohybující se vozidlo a jeden vzorek šumu.



Obrázek B.3: Ukázka grafu zobrazující signál obsahující pohybující se vozidlo.

Open File

Stop

Stream Player

Obrázek B.4: Ukázka záložky Player.

Record

00:00 0.0 MB

Disconnected 0 kB/s 0 Errors

Obrázek B.5: Ukázka záložky Record.